

Aus dem rechtsmedizinischen Institut
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktorin: Univ.-Prof. Dr. Stefanie Ritz-Timme

Überprüfung der Todeszeitschätzung mittels des Henßge-Nomogramms bei
Tod durch zentrale Ursachen unter besonderer Berücksichtigung eines
plötzlichen Abfalls der Umgebungstemperatur

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von Marcel Bovenschen

2022

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
gez.:

Dekan/in: Prof. Dr. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter/in: Prof. Dr. Benno Hartung

Zweitgutachter/in: Prof. Dr. Heiner Fangerau

„Time refines us
Death resigns us
And it's clever
For it never
Tells us when that moment is to be“
- TSO Time and distance - Paul O'Neill

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Forensic Science International. 2021 Feb;319:110656
Estimation of time since death after a post-mortem change in ambient
temperature: Evaluation of a back-calculation approach

Marcel Bovenschen, Holger Schwender, Stefanie Ritz-Timme, Kerim Beseoglu, Benno Hartung

Zusammenfassung:

Die sog. „Henßge-Methode“ [2-10] ist eine der verbreitetsten Methoden zur Schätzung der Todeszeit. Bei ihr wird aus einer Messung der rektalen Körpertemperatur und der Umgebungstemperatur ein Zeitintervall bestimmt, in dem der mit dem Lebensende verknüpfte Beginn der Leichenabkühlung wahrscheinlich begonnen hat. Dieses Intervall basiert auf einer Formel, welche Henßge aus dem Abkühlungsverhalten von Leichnamen ableitete. Diese mathematischen Ursprünge gehen letztlich auf Newtons Abkühlungsgesetz [28] zurück.

Da es bei cerebralen Schädigungen zum Effekt des sog. zentralen Fiebers, also einer Form der Hyperthermie kommt [22], stellte sich die Frage, inwiefern dieses einen Einfluss auf die Temperatur-gestützte Todeszeitschätzung hat, wenn dies in der Phase der Agonie geschieht [23]. Fünfundzwanzig Personen, die auf einer neurochirurgischen Intensivstation verstorben waren, wurden in die Arbeit eingeschlossen. Die Körpertemperatur wurde wiederholt gemessen, sowohl auf der Station innerhalb der ersten Stunde post mortem, wie auch zur jeweils dritten und neunten Stunde post mortal. Nach näherungsweise 3 Stunden post mortem (p.m.) wurden die Leichname in eine Kühlkammer verbracht. Zusätzlich wurden die Supravitalzeichen, die Totenfleckenentwicklung und Behandlungsinformationen (zum Beispiel Vorerkrankungen und Interventionen) dokumentiert. Unter Verwendung dieser Daten wurde dann das Todeszeitintervall bestimmt und mit dem tatsächlichen, bekannten Todeszeitpunkt verglichen.

Zur Verwendung bei Fällen bei denen es zu einer plötzlichen Veränderung der Umgebungstemperatur während des postmortalen Zeitintervalls (z.B. weil der Verstorbene in eine Kühlkammer gebracht wurde), wurde ein mathematischer Ansatz von Henßge vorgeschlagen, der diesen Temperatursprung berücksichtigen kann [1]. Die Ergebnisse wurden im Artikel: **Estimation of time since death after a post-mortem change in ambient temperature: Evaluation of a back-calculation approach; Forensic Science International. 2021 Feb;319:110656** veröffentlicht. Hierbei zeigte sich in der Regel, dass die Körper der Verstorbenen im Kühlraum langsamer abkühlten, als die Rückrechnungen erwarten ließen. Infolge dessen sollte dieser Ansatz zum Umgang mit plötzlichen Veränderungen der Umgebungstemperatur nur mit größter Vorsicht angewandt werden.

Die Ergebnisse stützen die Annahme, dass bei Todeszeitschätzungen mittels der o.g. Methoden stets ein Abgleich mit anderen Maßnahmen erfolgen sollte, um die

Sicherheit der Erfassung des tatsächlichen Zeitpunkts zu erhöhen [19].

Abstract:

The temperature-based "Henssge method" [2-10] is widely applied for death time estimation. It uses one measurement of the rectal body temperature and environmental temperature each to estimate the timeframe in which the cooling of the body has probably begun, which is directly connected to the time of death. This timeframe is based on a formular, which Henssge defined on the basis of his own experimental observations of the cooling of dead human bodies. The mathematical approach is based upon Newtons law of cooling.

In the case of central brain damage there is a long known effect of so called central fever, a form of hyperthermia [22], which brought up the question, if this would have an effect on the usage of temperature based estimation of time of death, when it occurs during agony [23]. The Henssge-method was evaluated under clinically controlled conditions. Twenty-five individuals who died in a neurosurgical intensive care unit were brought to cooling storage after approximately 3 h pm. Body temperature was repeatedly measured on the ward and in cooling storage over a period of 9 h pm, respectively in the first, third and ninth hour pm. In addition to this supvital signs and other post mortem effects were measured and documented, also informations about the clinical conditions and treatments prior to death. With this data the Henssge-method was applied and the results were compared to the known time of death.

For cases with a sudden post-mortem (pm) change in ambient temperature (e.g., by bringing the deceased into a cooling chamber), a mathematical approach has already been proposed by Henssge that enables estimation of the time of death by back-calculation of body temperature [1]. The results were published: **Estimation of time since death after a post-mortem change in ambient temperature: Evaluation of a back-calculation approach; Forensic Science International. 2021 Feb;319:110656**

It could be shown, that the bodies regularly cooled down slower after being brought into cooling storage than the back-calculations indicated. In conclusion, the evaluated approach for addressing pm changes in ambient temperature should only be applied with great caution and should be cross checked with other methods to ensure a more secure estimation of the real time of death [19].

Abkürzungsverzeichnis:

T_r: rectal temperature/Rektaltemperatur

T_a: ambient temperature/Umgebungstemperatur

T₀: temperature at the point of death/Temperatur zum Todeszeitpunkt

t also **X**: post-mortem interval/ post-mortales Zeitintervall

B: constant (measure of the logarithmic cooling rate after the plateau under individual consideration of body weight and corrective factor)/ Konstante (logarithmische Abkühlungsrate nach dem Plateau unter individueller Betrachtung von Körpergewicht und Korrekturfaktor)

A: constant (measure of the plateau)/ Konstante (Plateauwert)

t': second rectal temperature/ Zweite Rektaltemperatur

D: difference between t and t'/Differenz zwischen t und t'

r also **R**: Rate of cooling/Abkühlungsrate

Z: cooling factor/ Abkühlungsfaktor (degree/time cooling by specific temperature difference)/ Grad/Zeit Abkühlung bei einer bestimmten Temperaturdifferenz

Size Factor: 80% of body-surface/ 80% der Körperoberfläche

p: Slope factor of Z/ Steigungsfaktor von Z

Anmerkung zur Verwendung der Schreibweise Henßge/Henssge:

Der Autor auf den sich z. B. auch im Titel dieser Arbeit bezogen wird hieß Claus Henßge. Bei internationalen Veröffentlichungen verwendete er die Schreibweise mit Doppel s, da es das ß im modernen Englisch nicht als Zeichen gibt. Je nach zitierter Quelle, wurde der Name passend zur verwendeten Schreibweise in der Quelle angegeben (d.h. bei deutschen Quellen „Henßge“, bei englischsprachigen „Henssge“. Wird sich auf den Autoren an sich Bezogen oder er genannt, so wird die personenstandsrechtlich korrekte Schreibweise „Henßge“ benutzt.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	9
Ehtikvotum.....	12
Historischer Überblick über die Entwicklung der Henßge-Methode und der temperaturgestützten Todeszeitschätzung.....	13
Zentrales Fieber.....	27
Ziele der Arbeit.....	31
Material und Methoden.....	32
Publikation: Estimation of time since death after a post-mortem change in ambient temperature: Evaluation of a back-calculation approach; Forensic Science International. 2021 Feb;319:110656	33
Diskussion.....	40
Zusammenfassung.....	43
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	44
Anhang.....	46
Danksagung.....	47

Einleitung

Beim Auffinden einer Leiche ist oftmals der Zeitpunkt des Todes nicht bekannt, spielt jedoch in sog. Todesermittlungsverfahren eine zentrale Rolle, um den Tatablauf zu rekonstruieren.

Daher ist die Frage nach dem Todeszeitintervall (ugs.: Todeszeitpunkt) eine übliche Fragestellung an die Rechtsmedizin am Leichenfundort [24].

Es stehen grundsätzlich mehrere Verfahren dazu zur Verfügung, die auch kombiniert werden können. Jedes Verfahren hat Stärken und Schwächen [25].

Grundsätzlich muss zwischen Temperatur-basierten und nicht-Temperatur-basierten Verfahren unterschieden werden. Temperatur-basierte Methoden sind dabei im frühen postmortalen Intervall der Gold-Standard, solange die Körpertemperatur des Leichnams noch nicht an die Umgebungstemperatur angeglichen ist. Ferner werden im frühen postmortalen Intervall die Totenflecken, die Leichenstarre und sie sog. Supravitalreaktionen beurteilt.

Im späten postmortalen Intervall bei Vorliegen von Fäulnis- oder Verwesungszeichen kann der Entomologie eine wichtige Rolle zukommen [26].

An Temperatur-basierten Methoden sind in Deutschland die Finite-Elemente Modell nach Mall [17] sowie das Nomogramm nach Henßge im Einsatz [2-10], obgleich weitere Verfahren existieren [27] und die Nutzung des gedruckten Nomogramms von einer Softwarevariante abgelöst wurde.

Die Schätzung der Todeszeit mittels der Methode nach Henßge ist die seit Jahrzehnten in Deutschland verbreitetste Methode, um die Todeszeit eines Menschen anhand seiner Körperkerntemperatur - unter Beachtung seines Gewichtes, seiner Bekleidung oder Bedeckung und unter Beachtung der Auswirkung der Umgebungstemperatur, sowie besonderer Lagerungsumstände (z.B. kaltes Wasser, Luftzug etc.) - zu bestimmen.

Die hohe Akzeptanz liegt unter anderem an der einfachen Durchführbarkeit der Methode, den geringen Kosten bei der Durchführung und der relativ hohen Validität. Es werden geeichte Thermometer benötigt, die über entsprechend geeignete Messsonden verfügen (für Luft- und Rektalmessung), sowie genormte Bögen des Henßge-Nomogramms für den jeweiligen Temperaturbereich bzw. entsprechende Software- oder Online-Varianten. Das angegebene Intervall zeigt an, in welchem

Zeitraum der Tod mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit (2-fache Standardabweichung) eingetreten ist. Das Verfahren beruht auf Temperaturmessungen an Verstorbenen, also auf deren Abkühlungsverhalten. Die physikalischen Grundlagen (die auf Newtons Abkühlungsgesetz [28] zurückgehen) wurden von Henßge in eine Skala zur Ergebnisermittlung übertragen [2-10]. Daten zur Frage der Beeinflussung der Todeszeitschätzung durch perimortale Umstände sind kaum verfügbar. Auch Veränderungen der physikalischen Parameter in der Zeit zwischen dem Tod des Menschen und dem Auffindezeitpunkt sind nur sehr begrenzt untersucht worden.

Es ist aus der Physiologie bekannt, dass verschiedene Gehirnstrukturen, wie z.B. der Hypothalamus, einen besonders hohen Anteil an der Temperaturregulation des Körpers haben [29;30]. Ebenso weiß die Intensivmedizin um den Effekt des sog. „zentralen Fiebers“, d.h. hyperthermen Phasen infolge von krankhaften oder traumatischen Schäden des ZNS [23;31].

Dies wirft die Frage auf: Was geschieht mit der Körperkerntemperatur postmortal, wenn z.B. ein Schädel-Hirn-Trauma die Todesursache ist? Greift das Henßge Modell dann noch ausreichend gut? Und wie beeinflusst dies Henßges Ansatz für die Rückrechnung eines plötzlichen Temperaturabfalls in der Umgebung eines Leichnams?

Um dies zu überprüfen, wurden Messungen an Verstorbenen vorgenommen, deren Todeszeitpunkt genau bekannt war und die an einer zentralen Todesursache verstorben waren.

Daher wurde folgender Aufbau für diese Arbeit gewählt: Grundlage war eine Zusammenarbeit mit der neurochirurgischen Intensivstation des Universitätsklinikums Düsseldorf. Die dort diensthabenden Ärzte informierten den Autoren telefonisch, sofern ein Patient gerade verstorben war. Daraufhin begab sich dieser umgehend auf die neurochirurgische Intensivstation und nahm eine Leichenschau incl. Temperaturmessungen des Körperkerns und der Umgebung innerhalb der ersten Stunde nach dem Tod des Verstorbenen vor. Dann erfolgte die Dokumentation der Vorgeschichte (Erkrankungen, akuter Behandlungsanlass, erfolgte Behandlungen incl. Medikation, Todesursache gemäß Totenschein). In der dritten und neunten Stunde nach dem Tod erfolgten jeweils weitere Leichenschauen incl. Temperaturmessungen, sowie eine Erfassung des Zeitpunktes an dem der Proband in den Kühlraum verbracht und damit einem Temperatursturz ausgesetzt wurde.

Einschränkend ist festzuhalten, dass teilweise die Leichenschau aufgeschoben werden musste, da Angehörige bei dem Verstorbenen waren. Auch konnte es vorkommen, dass der Leichnam unerwartet von einem Bestatter abtransportiert worden war.

25 Verstorbene wurden vollständig (gemäß des Versuchsaufbaus) untersucht, bei 3 Verstorbenen konnten nur die ersten zwei Messungen gemäß Versuchsaufbau erfolgen. Bei 3 weiteren Verstorbenen war es nur möglich, sie in der ersten Stunde postmortal zu untersuchen. Daher beziehen sich die Ergebnisse dieser Arbeit nur auf das Kollektiv der 25 vollständigen Datensätze gemäß des Versuchsaufbaus, sofern nicht explizit anders angegeben.

Ethikvotum

Ein Ethikvotum seitens der Ehtikkommission der medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine Universität Düsseldorf wurde vor Beginn der Datenerhebung eingeholt. Dieses umfasste sowohl die Art der Datenerhebung, die Definition der erhobenen Daten, wie auch die Dokumentation und Anonymisierung von Patientendaten.

Dieses firmierte unter der Studiennummer 4553.

Temperatur gestützte Todeszeitschätzung in der Rechtsmedizin – ein Überblick über die Methodenentwicklung

Henßiges Modell zur Todeszeitschätzung basiert auf Erkenntnissen, die sowohl seiner eigenen Forschung entstammen, wie auch früheren Arbeiten, die sich mit dem Abkühlungsverhalten von Leichen beschäftigt haben:

1863 veröffentlichten Taylor und Wilks Temperaturergebnisse [18], die sie im Guy's Hospital in London an 100 Leichnamen mittels Temperaturmessung an der Bauchhaut in den ersten 12 Stunden post Mortem erhalten hatten. Taylor und Wilks stellten ein Abkühlungsverhalten in Analogie zur Newton'schen Regel fest: Ein Körper kühle proportional zur Differenz zwischen Eigen- und Umgebungstemperatur aus.

In einem nachfolgenden Manuskript [32] berichtete Taylor, dass bei 2 der 100 Probanden auch viszerale Temperaturmessungen erfolgt und deren Ergebnisse stark von der Hauttemperatur abgewichen seien.

Da sie neben Todesart auch Erkrankungen und Lagerungsbedingungen festhielten, erkannten Taylor und Wilks, dass Umgebungseinflüsse (z.B. Wasser, Luftzug, Kleidung und Gewicht/Konstitution) Einfluss auf das Abkühlungsverhalten nehmen. Taylor führte dies primär auf die Konduktionseigenschaften von menschlichem Gewebe zurück. Taylor und Wilks hatten bei ihren Untersuchungen ebenfalls das Phänomen beobachtet, dass manche Verstorbenen postmortal einen Anstieg der Temperatur von mehreren Grad Fahrenheit aufwiesen. Erklären konnten sie den Effekt nicht, aber Taylor stellte eine Korrelation mit fiebrigen Erkrankungen (Cholera, Gelbfieber) sowie ZNS – Schäden durch Trauma oder Erkrankung fest und verwies auf eine Fallbeschreibung [20], sowie diverse zeitgenössische Autoren, mit denen er darüber korrespondiert habe. Diese postmortalen Temperaturanstiege gab er mit bis zu 15° F (ca. 8,4°C) im Laufe von bis zu 6 Stunden an.

Im Jahr 1868 veröffentlichte Rainy einen Artikel über das Abkühlungsverhalten von Leichen und die Möglichkeit der Anwendung der Newton'schen Abkühlungsregeln [19]. Er postulierte, dass neben dem Auftreten von Fäulniserscheinungen und der Leichenstarre vor allem die Temperatur Aufschluss über den Zeitpunkt des Todes geben könnte. Dabei erkannte er das Problem, dass bei der Anwendung physikalisch-mathematischer Modelle, genauer dem Newton'schen Abkühlungsgesetz [28] diese von konstanten Faktoren ausgehen, die im Einzelfall vom Todeszeitpunkt bis zum Auffinden des Leichnams nicht sicher vorausgesetzt werden könnten.

Inspiziert durch die Arbeit von Taylor und Wilks [18] hatte Rainy zusammen mit einem befreundeten Arzt in der Glasgow Royal Infirmary an ebenfalls 100 Leichen rektale sowie umbilicale Temperaturmessungen in den ersten 24 Stunden p.m. vorgenommen. Dabei gab er an, das Abkühlungsverhalten bei gleichbleibender Temperatur und ohne Luftzug untersucht zu haben. Aufgrund des hohen Aufwandes, diese Messungen neben der ärztlichen Tätigkeit zu erheben, habe er letztlich nur 46 voll verwertbare Datensätze akquirieren können und selbst bei diesen habe man keine gleichgroßen Zeitintervalle für die Messzeitpunkte einhalten können.

Rainy stellte fest, dass er von einer „Starttemperatur“ zum Zeitpunkt des Todes ausgehen musste, um die newton'sche Berechnung überhaupt anwenden zu können. Er legte diese Temperatur auf 100°F (ca. 37,8°C) fest. Seine Untersuchungen umfassten eine Messung der rektalen und der Umgebungstemperatur zum „Auffindezeitpunkt“, sowie erneute Messungen jeweils 1 bis 3 Stunden später. Die rektale Initialtemperatur definierte er als t , die zweite Rektaltemperatur als t' . Die Differenz (D) der Rektaltemperaturen entspreche der Abkühlungsrate (r) und ergebe sich wie folgt: $t=t'+D$

Und weil $t>t'$, folge daraus $t/t'=r$

So ergebe sich: $(\text{Log}.D-\text{Log}.t')/\text{Log}.R = X$ und X entspräche nun den Stunden seit Todeseintritt.

Unter Verwendung des Newton'schen Abkühlungsgesetzes hätte die Abkühlungsrate proportional zur Temperaturdifferenz sein sollen. Rainy jedoch stellte fest, dass in den ersten Stunden nach dem Tod meist gar kein stärkerer Temperaturverlust auftrat, obwohl die Differenz zwischen Umgebungstemperatur und Rektaltemperatur hier am größten war. Teilweise kam es sogar zu einem Temperaturanstieg, den er auf bis zu 9°F bemaß und den er nicht genauer erklären konnte. Er vermerkte dazu lediglich, dass dieser Effekt sowohl von Taylor und Wilks [18] beschrieben worden sei als auch in diversen zeitgenössischen Vorträgen anderer Ärzte über Tod durch Cholera.

Rainy kam zu dem Schluss, dass die Todeszeitbestimmung über die Verwendung einer Temperaturmethode an sich funktioniere, jedoch in den ersten Stunden post mortem nur sehr bedingt aussagefähig sei. Unterhalb einer Körper-Temperatur von 85°F sei sie aussagekräftiger. Als Ergebnis der Todeszeitbestimmung betrachtete er das Minimum an Zeit, die seit dem Tod vergangen wäre, das Maximum gab er mit dem 1,5fachen Zeitwert an. Beides sei jedoch nur im Bewusstsein der gesamten Limitierungen der Methode zu sehen. Vor allem seien aber bei der Interpretation der

Zeit aber auch alle möglichen Effekte zu bedenken, die im Einzelfall eine Rolle spielen könnten (zum Beispiel Lagerung und Umwelteinflüsse etc.), die er jedoch nicht allgemeingültig zu beschreiben versuchte.

Im Jahr 1953 versuchten Schwarz und Heidenwolf den Abkühlungsverlauf mit einer Sigmoidalfunktion allgemeingültig für verschiedenste Lagerungsbedingungen zu beschreiben [33].

1956 griff De Saram die bis dahin bekannten Methoden erneut auf und versuchte, die Einflussfaktoren, die bisher bei der reinen Anwendung der Newton'schen Formel nicht erfasst wurden, zu integrieren [34]. Die oftmals unzureichende Genauigkeit der Ergebnisse führte De Saram auf drei Faktoren zurück, deren Wirkung bislang keinen Eingang in die Berechnungen gefunden hatten:

- Umgebungsbedingungen (z.B. Temperaturdifferenz zwischen Körper und Umgebung, Feuchtigkeit, Luftstrom)
- Eigenschaften des Leichnams (z.B. Gewicht, Erkrankungen, Flüssigkeitsauflagerungen)
- Bedeckung (Kleidung etc.)

Dazu untersuchte er 46, durch Erhängen exekutierte Strafgefangene in Colombo und Kandy (Indien). Die Probanden wurden zu Lebzeiten ausgewählt und umfassten möglichst gesunde, durchschnittlich trainierte Männer von ähnlicher Konstitution. Größe und Gewicht wurden erfasst, 41 Probanden trugen die gleiche Gefängniskleidung, die anderen waren unbekleidet.

Die Messungen begannen kurz nach dem Abnehmen der Probanden vom Galgen, 15 Minuten nach Durchführung der Exekution durch kontinuierliche, rektale Messung mit Erfassung der Temperatur alle 30 Minuten. Diese Messungen mussten jedoch für den Transport in De Sarams Institut unterbrochen werden, wurden dort angekommen jedoch sofort wieder fortgesetzt.

Alle Probanden hatten Körpertemperaturen zwischen 97,8 und 100°F zum Todeszeitpunkt und De Saram stellte fest, dass innerhalb der ersten Stunde kaum ein Temperaturverlust stattfand, er bezifferte diesen auf durchschnittlich 0,18°F. Nun versuchte De Saram Evaporation, Konduktion, Konvektion und Wärmestrahlung in die Berechnung einzufügen. Er entschied sich dafür, 2 verschiedene Formeln zu definieren, die je nach Stärke der Einflüsse ausgewählt werden mussten. Die Formeln konnten jedoch diese frühe Phase fehlender Abkühlung nicht reproduzieren.

Seine Methode hatte innerhalb von 8 Stunden post mortem eine vergleichbare

Genauigkeit wie die bisher übliche Methode nach Taylor und Wilks. Einen Einfluss von Bekleidung oder Größe und Gewicht konnte er bei seinem Versuchsaufbau jedoch nicht sicher nachweisen.

Von 1951 bis 1958 führten Marshall und Hoare im Leichenschauhaus von Leeds Experimente durch, welche die nächsten, entscheidenden Fortschritte brachten. Die Ergebnisse dieser Arbeit veröffentlichten sie 1961 [14]. Sie erstellten einen definierten Versuchsaufbau: Keine Bekleidung, stets gleicher Raum mit relativ konstanter Temperatur die um max. ca. 4 °F schwankte, jeweils 2 Bettlaken zwecks Isolation zur Unterlage, festgelegte Einschubtiefen der Thermometer, Erfassung von Größe und Gewicht. Dabei verglichen sie drei verschiedene Messstellen (Rektum, Achsel und Leber durch Stichinzision unter dem rechten Rippenbogen). Die durchgeführten Messungen erfolgten ca. alle 30 Minuten am Tag und ca. alle 60 Minuten während der Nacht. Messungen erfolgten so lange, bis die Temperatur der Leiche unter 70°F gefallen war. Es wurden 176 Verstorbene eingeschlossen, wovon allerdings 86 nicht in den Ergebnissen berücksichtigt wurden, da deren Temperaturverlaufskurven der drei Messstellen zu stark variierten und sich teilweise überschneiden, weshalb Messfehler für möglich gehalten wurden.

Die Temperaturverläufe von rektaler und intrahepatischer Messung verliefen parallel; die Achselmessungen allerdings waren viel variabler im Verlauf. So kamen Marshall und Hoare zu dem Ergebnis, dass die rektale Messung die zweckmäßigste sei, da sie ausreichend genau und einfacher durchführbar sei als die intrahepatische Messung. Die Kurvenverläufe zeigten ein Plateau innerhalb der ersten drei bis fünf Stunden der Abkühlungsphase. An diese Plateauphase schloss sich eine Phase der relativ starken Abkühlung an und zuletzt ging der Prozess in eine Phase der langsamen Annäherung an die Umgebungstemperatur über, woraus sie folglich drei Abkühlungsphasen definierten: 1. Verzögerungsphase/Plateauphase, 2. Phase der schnellen Abkühlung, 3. Phase der langsamen Abkühlung. Die Funktion dieses Temperaturverlaufs ergab eine Sigmoidal-Kurve.

Marshall und Hoare berechneten dann die Steigungsdifferenzen, womit sie einen Zusammenhang zwischen vergangener Zeit und der Stärke der Abkühlung herstellten. Diesen Zusammenhang nannten sie „*cooling faktor*“ (und wählten die Variable Z für ihn). Dieser Faktor gab an, um wieviel Grad pro Zeiteinheit ein Proband bei einer spezifischen Temperaturdifferenz zwischen Körper- und Umgebungstemperatur abkühlte.

Sie beschrieben, dass Z zu Beginn der Abkühlung stark anstieg, dann jedoch langsamer wurde. Nach ca. zwölf Stunden post Mortem erreichte Z sein Maximum und blieb annähernd konstant. Dies bewies, so Marshall und Hoare, dass Newtons Abkühlungsgesetz eben nicht für die ersten zwölf Stunden der Abkühlung eines Leichnams gelte, da nach diesem eine konstante Abkühlung hätte stattfinden müssen. Des Weiteren zeigte sich hier erneut das bekannte Problem, dass es Probanden gab, die nicht nur ihre Temperatur in der Initialphase hielten, sondern sogar noch wärmer wurden – etwas, das mit Newtons Abkühlungsregeln grundsätzlich nicht vereinbar ist. Marshall und Hoare diskutierten diesbezüglich zwei verschiedene Ursachen: 1. Die Möglichkeit, dass auch post mortem vorübergehend metabolische Prozesse auf zellulärer Ebene weiterlaufen, die unter anderem zur Erwärmung beitragen; 2. Strukturbedingt besteht der Körper aus diversen Schichten und Kompartimenten, die voneinander durch Grenzflächen wie z.B. Membranen getrennt sind. Da diese Schichten und Kompartimente unterschiedlich schnell auskühlen und unterschiedliche Initialtemperaturen zum Todeszeitpunkt haben könnten, könnten sich auch noch zusätzlich gegenseitig beeinflussen. Letztlich konnten sie keine einzelne Ursache feststellen und gingen von einer Kombinationswirkung der beiden Effekte aus.

Basierend auf der Erkenntnis, dass sich Z nach 12 Stunden nicht mehr verändert und Newtons Abkühlungsgesetz damit wieder anwendbar war, konnten Marshall und Hoare einen Zusammenhang zwischen Masse und Oberfläche in Bezug auf Abkühlung herstellen. Hier griffen sie Beobachtungen von De Saram auf, der bereits einen „*Size Factor*“ beschrieben hatte. Dieser war invers proportional zur Statur des Verstorbenen (je „kräftiger“ die Statur, desto kleiner der Faktor). Auf physiologischen Erkenntnissen basierend definierten sie die Abstrahlungsfläche des Körpers als 80% (der Rest entfällt auf Arm- und Beinflächen, die anderen Körperpartien zugewandt liegen und infolge dessen diese anstrahlen). Der „*Size Factor*“ erwies sich als proportional zum „*cooling factor*“. Somit konnten Marshall und Hoare erstmals Formeln erstellen, mit denen es möglich war, die bekannten Todeszeiten ihrer Probanden annähernd zu errechnen.

In einem Folgeartikel [35] beschäftigte sich Marshall mit dem Problem, dass bei einem nicht-experimentellen Leichenfund nicht alle benötigten Informationen zur Verfügung stehen, was die Nutzung der an sich funktionalen Formel einschränkte. Daher leitete er Mittelwerte für den Anstieg (p) seines „*cooling factor*“ (Z) ab, welche

sich als hinreichend genau erwiesen (min. 0°F, max. 1,2 °F). Dann erstellte er so genannte „Standard-Abkühlungskurven“ für gängige Körpergrößen und Gewichte bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und nach verschiedenen Zeiträumen, wobei die Körpergröße und Körpermasse bzw. der „*Size Factor*“ sich anhand dieser Kurven in kälteren Umgebungsbedingungen als stärker beeinflussend darstellten (je größer und schwerer, desto langsamer), als bei Temperaturen die näher an der Körpertemperatur liegen. Infolge dessen formulierte er den durchschnittlichen Temperaturverlust eines durchschnittlichen, unbedeckten Menschen bei einer konstanten Temperatur von 60°F (ca. 16°C) mit ca. 1,2°F pro Stunde.

Aus Vergleichen mit den Standard-Abkühlungskurven für Unbedeckte erkannte Marshall, dass er die Stärke des „*cooling factors*“ bei Bedeckten verringern musste. Er senkte p um 0,1 und konnte damit auch die Temperaturen der Bedeckten mittels seiner Formel hinreichend gut ermitteln.

Ein weiteres Mal diskutierte er auch die intrahepatische Messung und stellte fest, dass im Vergleich zur rektalen Temperatur hierbei viel häufiger diese nicht post mortal abfiel oder sogar noch anstieg – somit sprach Marshall sich erneut gegen die intrahepatische Temperaturmessung aus.

Marshall stellte fest, dass alle mathematischen Modelle von einer konstanten Umgebungstemperatur ausgingen bzw. keine wechselnden Umgebungsbedingungen erfassen konnten. Er beschrieb, dass Durchschnittswerte unter durchschnittlichen Bedingungen hinreichend genau funktionieren, jedoch an ihre Grenzen stoßen würden, sobald einer oder mehrere Faktoren nicht mehr dem Durchschnitt entsprächen. Nahezu unmöglich wäre es, alle möglichen Temperaturveränderungen, denen ein Leichnam ausgesetzt gewesen sein könnte, zu erfassen. Daneben wies er auf das Problem hin, dass der „*size-factor*“ erfordere, neben Größe und Gewicht relativ genau zu bestimmen, wieviel der Körperoberfläche an der Wärmeabstrahlung über welchen Zeitraum beteiligt ist, denn potenzielle Fehler bei diesem Faktor würden sich bei längerer Liegezeit exponentiell auswirken.

Marshall entwarf in diesem Artikel auch ein Konzept, den problematischen „*cooling-factor*“ (Z) und den „*size-factor*“ zu umgehen, wozu er empfahl fünf Messungen, stets 30 Minuten voneinander entfernt, durchzuführen und aus diesen Mittelwerte zu bilden. Dies wäre technisch einfacher durchzuführen und vermindere Fehlerquellen. Nachteilig hier sei jedoch, dass man das Abkühlungsgeschwindigkeitsmaximum ohne „ Z “ nicht einfach erkennen könne, weshalb er eine graphische Auftragung vorschlug,

um aus der Kurve „Z“ ablesen zu können. Denn ohne „Z“ wäre es evtl. nicht möglich zu bestimmen, in welcher Abkühlungsphase man aktuell sei.

Letztlich räumte auch Marshall ein, dass nicht sämtliche Variablen erfassbar seien. Auch eine konstante Temperatur in der Leichenumgebung die sehr hoch, oder gar der Körpertemperatur entsprechend sei, wäre ein Problem für die Aussagekraft seiner Methode.

Die von Marshall und Hoare entwickelte Formel lautete zu diesem Zeitpunkt:

$$\frac{T - TU}{T_0 - TU} = \frac{p}{p-Z} e^{-Zt} = - \frac{Z}{Z-p} e^{-pt}$$

T = tiefe Rektaltemperatur

T₀ = Rektaltemperatur zum Todeszeitpunkt (auf 37,2°C gesetzt)

TU = Umgebungstemperatur

t = Zeit seit Tod in Stunden

p = Postmortales Temperaturplateau (- 0,4)

Z = mittlerer Kurvenanteil nach dem Plateau

Letztlich ist es bemerkenswert, dass die Ergebnisse von Marshall und Hoare zur Zeit ihrer Veröffentlichung wenig beachtet wurden.

1965 veröffentlichte Shapiro einen Artikel in dem er das Problem beschrieb, welches in den Randbereichen bei der Anwendung verallgemeinernder Formeln aufträte [37]. Die Formeln würden in der mittleren Abkühlungsphase, also wenn die Kurve die stärkste Absenkung pro Zeit darstellt, am besten funktionieren. Sobald man jedoch in den Plateau-Bereichen sei, träten zunehmend Probleme auf. Die intraperitoneale Temperatur im Bereich der Leber bleibe über Stunden relativ konstant [38]; außerdem sei die schlechte Konduktion in menschlichen Geweben als weiterer Einflussfaktor zu bedenken.

Marshall und Brown griffen 1974 noch einmal die Forschung zur temperaturgestützten Todeszeitbestimmung auf [39] und schlussfolgerten, dass das Zwei-Exponenten-Modell hinreichend aussagekräftig für eine praktische Anwendung sei. Grundsätzlich sei Newtons Abkühlungsgesetz auch für menschliche Leichen anzuwenden. Das Problem der nicht ausreichenden Beschreibung des

Abkühlungsverhaltens liege also nicht in der Formel an sich, sondern trete bei der Interpretation von Bedingungen durch die Forschenden auf. In der Realität bestehe ein menschlicher Körper aus vielen Kompartimenten von denen bekannt ist, dass sie nicht alle die gleiche Temperatur im lebenden Organismus und damit auch nicht bei Todeseintritt haben [29;30]. Da die Rektaltemperatur die am einfachsten zu erhebende und gleichzeitig genaueste sei, sich diese jedoch erst ändere, wenn alle „darüber liegenden“ Schichten nach und nach zur Konduktion rekrutiert worden sind, ergebe sich das Plateau.

Marshall und Brown bezogen sich dabei auf die Formel von Carslaw und Jaeger[40] für die sigmoidale Abkühlungskurve von komplexeren, inhomogenen Körpern. Diese Formel stellt die Differenz zwischen Kern und Hülle eines Körpers dar. Sie beschreiben mehrere Varianten der Berechnung die durch z.B. Kürzen der Terme abgewandelt werden konnten, welche die vergangene Zeit seit Eintritt des Todes ungefähr ermitteln konnten:

$$\frac{T_r - T_f}{T_{b0} - T_f} = \Phi = a_1 e^{-a_1 t} + a_2 e^{-a_2 t}$$

Dabei gilt: $t=0$; $T_r=T_{b0}$ = Temperatur in radialer Auftragung ; a_1, a_2 sind experimentell zu bestimmen.

Letztlich sei diese Formel hinreichend genau, wobei Marshall und Brown darauf hinwiesen, dass sie genauere Ergebnisse erzielen würde, wenn man nicht die Werte der von Marshall und Hoare erstellten Standardabkühlungskurven [41] verwende, sondern jeweils Messungen von eben jenem Leichnam, dessen Todeszeit man bestimmen wolle und für jeden Fall eine eigene Idealkurve erstelle. Dies gelte insbesondere für die Einflüsse von Umgebungsbedingungen. Daher sprachen sich Marshall und Brown für das Erheben mehrerer Messungen aus, um die Randbereiche abschätzen zu können – eine exakte Berechnung erschien ihnen unter realen Bedingungen unmöglich.

Ende der 1970er Jahre wandte sich Claus Henßge der temperaturgestützten Todeszeitbestimmung zu. Er griff die Formel von Marshall und Hoare, das so genannte Zwei-Exponenten-Modell, auf. Der Name „Zwei-Exponenten-Modell“ rührt dabei vom Sigmoidalverlauf der Funktion. Henßge modifizierte die Formel, indem er den

Newton-Koeffizienten (Z) der Formel vereinfachte und die statistischen Abweichungen der wahren, gemessenen Temperaturen von den ermittelten Temperaturverläufen unter Standardbedingungen bestimmte [3; 4] Durch empirisch bestimmte Gewichtungsfaktoren konnte Henßge die Formelanwendung weiter vereinfachen und die Abdeckung von Auffindesituationen verbessern:

$T - T_U$

$$\frac{\quad}{37,2 - T_U} = 1,25 e^{Zt} - 0,25 e^{SZt}$$

37,2 - T_U

Die Faktoren des ersten Formelteils blieben dabei identisch mit Marshall und Hoares Formel (siehe oben): T bleibt die gemessene, tiefe Rektaltemperatur. T_U ist weiterhin die Umgebungstemperatur und die Rektaltemperatur zum Todeszeitpunkt bleibt ebenfalls gleich, sie wird nur direkt mit ihrem Zahlenwert ausgedrückt.

Z wird nach Henßge auf Grundlage seiner empirischen Bestimmung wie folgt definiert: $-1,2815(f \times M^{-0,625}) + 0,0284 = Z$

M steht dabei für die Körpermasse in Kilogramm (kg), f ist der Korrekturfaktor der Abweichung des Abkühlungsverhaltens von der Standardabkühlung (ebenfalls empirisch bestimmt, siehe oben). Damit hatte Henßge eine Forderung von Marshall und Brown erfüllt, experimentell bestimmte Faktoren einzufügen.

Den größten Einfluss gewann die Henßge-Methode jedoch vor allem durch die Erstellung des so genannten Nomogramms. Das Nomogramm als Skala mit definiertem Prozess des Datenauftrags benötigt keine Berechnung, womit seine Anwendung einfach und schnell durchführbar ist. Dabei liefert es Ergebnisse, die nicht viel weniger genau sind, als die ihm zu Grunde liegende Rechnung – hier wurde eine ggf. geringe Ungenauigkeit durch Auftragungs- oder Ablesefehler in Kauf genommen, da sie im Durchschnitt eine viel geringere Bedeutung hat, als ein wahrscheinlicherer Fehler in der Formelanwendung.

In den Folgejahren erstellte die Arbeitsgruppe um Henßge einen Temperatur-„Dummy“, einen Testkörper, der ähnliche Abkühlungseigenschaften wie ein menschlicher Leichnam besitzen soll. Besondere Lagerungsbedingungen und deren Effekte auf das Abkühlungsverhalten von Leichen wurden untersucht ([5];[6]). Neben seiner Arbeit am Nomogramm, griff Henßge das Konzept der Hirntemperaturmessung wieder auf, das bereits 1957 von Lyle und Cleveland in seiner Grundkonzeption veröffentlicht und von Brinkmann et al. in den 1970ern

erweitert worden war [42;43] Hier zeigte sich, dass das Zwei-Exponenten-Modell auf Messungen der Hirntemperatur anwendbar sei [44]: Insbesondere wurden Hirnmasse, Hirnvolumen, Kopfmaße und Behaarung festgehalten. Die Lagerung erfolgte uneinheitlich: Teilweise auf einer Holzaufgabe in einer Kühlkammer und teilweise auf Metallbahnen in einem Flur. Die Messsonden der Thermometer wurden über die Fissura orbitalis superior bis ca. zur Kopfmittle in sagittaler Richtung eingeführt.

Um die bekannten Todeszeiten zu errechnen, kam die von Brown und Marshall [39] veröffentlichte Version der Zwei-Exponenten-Modell Formel zur Anwendung:

$$\frac{T_r - T_f}{T_{b0} - T_f} = \phi = a_1 e^{-a_1 t} + a_2 e^{-a_2 t}$$

Henßge zeigte, dass die Todeszeitbestimmung anhand der Hirntemperatur grundsätzlich möglich ist und erstellte auch dafür ein Nomogramm. Allerdings wies er darauf hin, dass der Kopf schneller auskühle, als der Körperstamm und damit die Hirntemperatur eher von den Umgebungsbedingungen und ggf. auch deren Änderungen beeinflussbar sei.

1988 begann Henßge die Methode zu modifizieren [45]: Neben der reinen Körpertemperatur wurden auch andere Einflussfaktoren, die Supravitalzeichen (elektrische und mechanische, sowie chemische Muskeleerregbarkeit), sowie die Beschaffenheit der Totenflecke in die Betrachtung einbezogen. Durch das Erheben dieser Befunde, deren Auftreten allein zu unzuverlässig zur Todeszeitbestimmung war, ließ sich eine einfache Plausibilitätsprüfung der Todeszeitermittlung durchführen, was zu einer höheren Genauigkeit der Ergebnisse führte.

Als nächstes wandte sich Henßge den sog. Korrekturfaktoren zu [7]. Hierzu hatte er 98 Abkühlungsversuche mit Dummies unternommen, jeweils in einem Luftstrom, sowohl bekleidet als auch bedeckt mit Textilien. Er stellte fest, dass der Einfluss bei stärkerer Isolation zunehme und vor allem bei vom Durchschnitt abweichender Körpermasse einen größeren Einfluss habe. Infolge dessen erstellte Henßge gewichtsabhängige Lagerungsfaktoren (von ihm selbst als Korrekturfaktoren bezeichnet), indem er die Bedingung „unbekleidet und ohne Luftzug“ als Standard mit dem Faktor 1 belegte, andere Lagerungsbedingungen jedoch mit kleineren (bis 0,35) oder größeren (bis 2,0) Faktoren versah. Mit diesen Faktoren wird das Gewicht des

Leichnams multipliziert und dann das Nomogramm wie herkömmlich angewandt. Dadurch wurde zwar eine weitere Variable in die Erhebung eingefügt, die in der Regel zu einer höheren Genauigkeit der Todeszeitbestimmung führt aber auch eine Fehlerquelle darstellen kann.

Zwischen 1993 und 1997 sammelte Henßge gemeinsam mit anderen Rechtsmedizinern Daten aus 72 realen Fällen, auf die seine Methode incl. Korrekturfaktoren angewandt wurde [11]. Die Autoren verglichen die errechnete Todeszeit mit den polizeilich ermittelten Todeszeiten, des Weiteren erstellten sie verschiedene Berechnungen mit verschiedenen Korrekturfaktoren für die wahrscheinlichsten Interpretationen der Lagerungsbedingungen und berechneten diese auch mit einer dafür erstellten Software. Es zeigte sich, dass die Anwendung der Korrekturfaktoren Schwierigkeiten bereitete. Je früher postmortal die Messung erfolgte und je leichter der Verstorbene war, desto geringer fiel der Fehler aus. Je später gemessen wurde und je schwerer der Verstorbene war, desto größer wurde der Fehler bei der Wahl eines Korrekturfaktors. Doch trotz allem war die Annahme einer falschen Durchschnittstemperatur der Umgebung der schwerwiegendste Fehler. Oftmals, so die Autoren, wurden Temperaturen die am Leichenfundort gemessen wurden, einfach als Durchschnittstemperatur angenommen, anstatt die Extremwerte am Ort und im die Leichenliegezeit betreffenden Zeitraum, zu ermitteln und eine realistische Durchschnittstemperatur zu errechnen. Ausdrücklich wiesen die Autoren darauf hin, dass die Methode nicht dafür gedacht sei, bei Fällen verwendet zu werden, in denen der Leichnam erst später an den Fundort gelangt, so dass die dort herrschenden Bedingungen nur partielle Einflüsse die auf den Leichnam haben.

1999 setzten Henßge und Althaus Dummys plötzlichen, starken Veränderungen der Umgebungstemperatur aus, ausgehend von der Annahme, dass nur ein Teil potenzieller Leichenfundorte eine relativ konstante Temperatur über längere Zeit halten [1]. Bei diesen Fällen waren Leichname aus Umgebungen mit relativ hoher Umgebungstemperatur nach der Tat an andere Orte mit relativ tiefer Umgebungstemperatur verbracht worden, was die Berechnung mittels Durchschnittstemperatur nicht unmöglich, aber tendenziell ungenauer machte. Dazu kam, dass die fehlerhafte Annahme der Fundort sei der einzige Lagerungsort das Bestimmen einer annähernd realistischen Durchschnittstemperatur zusätzlich verhinderte.

Dazu wählten sie Dummys für Kinder und Erwachsene aus und führten zwei

Testreihen durch: Zuerst wurden zwölf Dummies zunächst bei 21°C gelagert und dann in einen Raum mit 4°C verbracht. In der zweiten Testreihe wurden acht Dummies in einen 4°C kalten Raum gelegt, um dann nach festgelegter Zeit in einen 21°C warmen Raum transportiert zu werden. Anschließend kam die Formel von Marshall und Hoare [14] in der Modifikation nach Henßge zur Anwendung.

Mit den bekannten Zeitpunkten der Temperaturwechsel ließ sich die erste Reihe, „von warm nach kalt“, durch Addition der Einzelergebnisse der Zeiträume hinreichend genau berechnen. Für die zweite Testreihe, „kalt nach warm“, funktionierte das nicht. Es zeigte sich ein zweites, weniger stark ausgeprägtes Temperaturplateau bei starken Temperaturveränderungen der Umgebung; bei Erhöhung der Umgebungstemperatur von mindestens 15°C lässt sich das Ausmaß dieses zweiten Plateaus, jedenfalls unter Verwendung des Zwei-Exponenten-Modells, nicht mehr berechnen.

Im Jahr 2007 veröffentlichte Henßge Daten zum Einfluss einer Bedeckung mit Blättern verschiedener Stärke und Beschaffenheit. Bedeckungen von 2 und 10 cm mit sowohl trockenen, wie feuchten Blättern wurden untersucht und der Einfluss auf die Korrekturfaktoren bestimmt [10]. Hierbei zeigte sich, dass feuchte Blätter mit einem Korrekturfaktor von 1,0 quasi keinen Einfluss ausübten, trockene Blätter hingegen diesen auf 1,3 bis 1,5 erhöhten. Wurde der Dummy sowohl mit Bekleidung, als auch trockenen Blättern bedeckt, so verstärkte sich die Isolation auf einen Faktor von über 2. Es musste ein Korrekturfaktor von bis zu 2,7 verwendet werden um den Effekt hinreichend abzubilden.

2008 wurde versucht dem Problem der zwischenzeitlichen Wiedererwärmung während der Abkühlungsphase beizukommen. Von Taylor und Wilks bis Henßge gingen alle hinreichend funktionierenden Berechnungen von einer Abkühlung bis zum Angleichen an die Umgebungstemperatur aus. Auch stärkere Temperaturabfälle ab einer bestimmten Zeit kommen in den Modellen vor, jedoch kein funktionierender Ansatz zum Erfassen eines erneutes Anstiegs der Umgebungs-Temperatur nachdem die Abkühlung bereits eingesetzt hat. Die Verwendung von Durchschnittstemperaturen sollte wechselnden Temperatureinflüssen Rechnung tragen, doch kann dieses Hilfsmittel nicht darstellen, wie ein erneutes Erwärmen innerer Schichten nach dem Wärmezufuss wieder gegen die äußeren Schichten isoliert ist und wie die Abkühlung insgesamt erneut verzögert wird.

Henßge et al. verwendeten Daten aus den Dummy-Versuchen von 1999 und vollzogen

den zuletzt verwendeten Rechenweg nach [1]. Dabei erstellten sie einen Term (d), der das zweite Zeit-Plateau bei plötzlichem Absinken der Umgebungstemperatur beschreibt. Unter der Bedingung, d sei größer als Δt (Zeit zwischen dem Wirkbeginn der Temperaturänderung), was es sein müsse, um die Abkühlungszeit zu verlängern, könnte man mit einem zusätzlichen Schritt gegenüber dem plötzlichen Abfall auch die plötzliche Erhöhung der Umgebungstemperatur berechnen. Die Zeitpunkte der Umgebungstemperaturwechsel, wie auch die exakte Differenz zwischen diesen, müssten dazu jedoch bekannt sein. Da dieser Lösungsansatz jedoch letztlich unrealistische Annahmen enthielt, die in der Praxis nahezu kaum erfüllbar sein dürften, war er nicht geeignet, eine Lösung für die temperaturgestützte Todeszeitbestimmung von solchen Leichnamen zu bieten, die während der Abkühlungsphase in Umgebungen verbracht wurden, die 15°C oder wärmer sind als der Ort der initialen Abkühlung.

In den nächsten Jahren wurde die Methode nach Henßge kritisch hinterfragt: So wurde z.B. das polynomiale Regressionsmodell vorgestellt das sich speziell dem Problem stark schwankender Umgebungstemperaturen widmet und den Henßge zugrundeliegenden Ansatz Newtons einer gleichbleibenden Umgebungstemperatur während des Vorgangs der Abkühlung als zu theoretisch und letztlich fehleranfällig ablehnt. Diese Fehler sollen durch Anwendung einer Regressionsanalyse vermindert werden [46]. Ferner wurde kritisiert, dass oftmals nur für einen Teil der Zeiträume der Leichenlagerung eine Temperatur zu ermitteln sei: Anhand von 35 Abkühlungsexperimenten mit Verstorbenen wurde eine mathematische Lösung über die Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate vorgestellt, gemeinsam mit dem Minimum-Suchalgorithmus nach Powell. Dabei erreichte sie ein ähnliches Konfidenzintervall wie Henßge – konnte diese jedoch wegen der Verwendung der Methode Henßges naturgemäß nicht unterschreiten [47].

2007 wandte sich Henßge der Frage zu, was für einen Einfluss ein plötzliches Erhöhen der Umgebungstemperatur hat. Erneut verwendete er seine eigens entwickelten Dummies. Über ein System mit vier Rechenschritten konnte er ein ΔT in seine Formel einführen und mit diesem auch einen entsprechenden Temperatursprung berechnen, allerdings nur dann, wenn sowohl der Temperaturwechsel, als auch der Zeitpunkt dieses Wechsels bekannt war [13].

2011 wurde eine Dissertation veröffentlicht, in der Henßges Methode anhand von 46 Verstorbenen überprüft wurde. Hier ergab sich, dass mit Henßges Methode bei 17%

(ca. 8) der Probanden die exakte Todeszeit (im Rahmen einer halben Stunde) ermittelt werden konnte. 52% (ca. 23) der Todeszeiten lagen innerhalb der Zeitspanne, welche die Methode als Ergebnis ausgab, 31% (ca. 14) der Todeszeiten lagen jedoch außerhalb des Intervalls nach Henßge. Die Autoren hatten sich hier, aufgrund der hochkomplexen Lagerungssituationen, dazu entschieden, nur die Standardvarianten der Umgebungstemperatur zu verwenden und stellten fest, dass dies zu einer Erhöhung der Ergebnisgenauigkeit führte. Bei der Hälfte der Probanden führten die Autoren eine zweite Messung durch und stellten erneut fest, dass dies die Genauigkeit weiter erhöhte. Außerdem stellten sie fest, dass die Genauigkeit in den ersten 10 Stunden post Mortem höher war, als im Zeitraum danach [12].

2020 wurde von L. Wilk et al. das Finite-Elemente Modell gemeinsam mit Hautthermographie in einer kombinierten Methode verwendet, welche die Zeitintervalle auf durchschnittlich +/- 38 min. reduziert habe, anstelle der bisherigen +/-3 bis 7 Stunden [21].

2021 veröffentlichte Potente seine Prism benannte Methode, welche auf einem „brute force“ Rechenansatz basiert. Hierbei werden extrem viele mögliche Gewichte für Abkühlungstemperaturen errechnet und graphisch aufgetragen. Die Todeszeit wird dann durch die sich ergebenden Abkühlungskurvenverläufe dadurch ermittelt, dass ihre Verlaufsform analysiert wird. Dies mindert Ungenauigkeiten durch Störfaktoren z.B. bei der Auswahl von Lagerungsfaktoren [57].

Zentrales Fieber

Fieber allgemein

Als Fieber wird allgemein eine pathologische Erhöhung der Körpertemperatur über den durchschnittlichen oder „Normalwert“ von ca. 36,9 bis 37,2°C bezeichnet, die nicht die Folge einer externen Erwärmung oder erhöhter willentlicher Muskelaktivität ist. Eine allgemein anerkannte Temperatur, ab der von Fieber gesprochen wird existiert nicht. Manche Quellen bezeichnen Temperaturen oberhalb von 37,2°C aber unterhalb von 38,0°C als „subfebril“, andere sprechen bereits ab 37,5°C von Fieber. Jedoch werden Temperaturen oberhalb von 38,3 °C stets als Fieber definiert.

Die zugrundeliegende Temperaturerhöhung erfolgt durch eine „Sollwert“-Verstellung im Hypothalamus: Makrophagen, die z.B. durch Antigenkontakt aktiviert wurden, schütten Zytokine, unter diesen so genannte endogene Pyrene aus. Diese umfassen vor allem Interleukine (IL-1 alpha, beta, 6, 8 und 11), Interferone (IF-alpha2 und gamma), Tumornekrosefaktoren (TNF-alpha und beta) und Makrophagen-inflammatorisches Protein (MiP1) [48].

Diese Zytokine gelangen mit dem Blutstrom durch die hirnversorgenden Gefäße zum Zentralnervensystem, von der Arteria communicans anterior zum Beispiel über deren ventrale Äste zur Area praeoptica hypothalami, aber auch zu Arealen wie dem Organum vasculosum laminae terminalis. Diese Regionen zeichnen sich dadurch aus, dass dort nicht, wie an den meisten anderen Arealen des Gehirns, die Blut-Hirn-Schranke bestehend aus Tight-Junctions der kapillaren Endothelzellen, der Basalmembran jenes Endothels, sowie Ausläufern der Astrogliazellen den Stofftransport hemmt, beziehungsweise verhindert [49].

Dort lösen die Zytokine, nach dem Übertritt ins Zellmilieu der Nervenzellen über die Umwandlung von Prostaglandin 2 aus Arachidonsäure mittels Cyclooxygenasen (Cox 1 und 2) die Sollwertverstellung und damit Fieber aus. Parallel dazu gibt es auch Hinweise über weitere, neuronale „Fieberaktivierung“: Hier sorgen die peripher ausgeschütteten Zytokine für die Aktivierung von Vagusafferenzen, die sich zum Nucleus solitarius fortleiten und dort noradrenerg ebenfalls in die Area praeoptica hypothalami projizieren. Die Noradrenalinausschüttung dort sorgt dann wie oben beschrieben ebenfalls für eine Prostaglandinausschüttung [48].

Prostaglandin 2 und andere Arachidonsäurederivate verursachen eine verzögerte, lang andauernde Vasodilatation. Außerdem erhöhen sie die Nozizeption durch

Bradykinin, welches die Schmerzempfindlichkeit steigert. Bradykinin sowie die Prostaglandine wiederum erhöhen die Gefäßpermeabilität, so dass vermehrt Flüssigkeit aus den Gefäßen in die Extrazellulärmatrix übertreten kann und sich Ödeme bilden [50].

Dabei ist der genaue Mechanismus der „Sollwerterhöhung“ und der anschließenden Erwärmung nicht gänzlich geklärt, vermutlich spielen Katecholamine (Adrenalin, Noradrenalin) und Leptin eine entscheidende Rolle, indem sie sowohl auf die Herzleistung, wie die periphere Durchblutung, sowie auf die Aktivierung von Entkopplungsproteinen der Atmungskette über Alpha- und Beta-Rezeptoren einwirken. Diese membranständigen Rezeptoren aktivieren Adenylycyclasen, welche dann die Konzentration von cyclischem Adenosinmonophosphat (cAMP) in den Zellen erhöhen was wiederum Entkopplungsproteine/Uncoupling Proteins (UCP, hier vor allem UCP-2 und UCP-3) induziert [29]. Diese Proteine ermöglichen den Protonendurchtritt durch die Mitochondrienmembran ohne chemiosmotische Kopplung, also nicht mittels der ATP-Synthase, wie herkömmlich. Infolge dessen wird dabei weniger Adenosintriphosphat (ATP) gebildet, stattdessen finden vermehrt Reduktionen innerhalb der Membran durch die H⁺-Ionen/Protonen statt, was sich vereinfacht in mehr Wärmeerzeugung, bei gleichzeitig weniger gebildeten, chemischen Energiesubstraten ausdrücken lässt [51; 52].

Entkopplungsproteine sind beim Erwachsenen nachgewiesen in Hirnzellen und weißen Fettzellen (UCP-2) sowie in Skelettmuskelzellen (UCP-2 und UCP-3), außerdem sind sie im, hauptsächlich kindlichen, braunen Fettgewebe (UCP-1) nachgewiesen [53].

Außerdem sorgen Zytokine, sofern sie die Leber erreichen, für die Induktion einer ganzen Reihe weiterer Proteine, welche die Körperabwehr verstärken, den so genannten „Akute-Phase-Proteinen“. Diese umfassen Komplement- und Gerinnungsfaktoren, Protease-Inhibitoren und metall-bindende-Proteine [54].

Neben der Erhöhung der Körpertemperatur bei Fieber erfolgt auch eine Erhöhung der Herzfrequenz um ca. 8 bis 12 Schläge pro Minute, bei gleichzeitiger Verminderung der peripheren Durchblutung zwecks verringerter Wärmeabgabe, sowie Muskelzittern bis zum so genannten „Schüttelfrost“, was ebenfalls der Wärmeerzeugung dient [48].

Zuletzt kommt es zu einer Leistungsminderung und Abgeschlagenheit, sowie zum vermehrten Auftreten von so genanntem „Slow-Wave“-Schlaf, also Delta-Wellen mit

einer Frequenz zwischen 0,5 und 3 Hz im Elektroenzephalogramm, der als besonders regenerativ gilt [48].

Das Ziel der Temperaturerhöhung und des Symptomkomplexes Fieber ist eine Verbesserung der Abwehrlage des Organismus, wobei nicht alle Aspekte des Fiebers vollständig erforscht sind. Jedoch gibt es diverse beschriebene Effekte die eine grundsätzliche Nützlichkeit belegen:

Die Temperaturerhöhung hemmt die Vermehrung mancher Erreger, bei einzelnen reicht sie sogar aus, diese abzutöten. Des Weiteren sinken die Konzentrationen verschiedener Metalle im Blut (Eisen, Kupfer, Zink), sowie verschiedener Proteasen die ebenfalls essentiell für die Vermehrung vieler Erreger sind. Die Leistungsminderung spart Energie und Ressourcen, die dann infolge dessen nur noch mit großem Aufwand für anderweitige Verwendungen als der Erkrankungsbekämpfung aufgewendet werden können und so für die Erkrankungsabwehr erhalten bleiben [48;54].

Fieber ist also eine allgemeine/systemische Abwehrreaktion des Körpers als Folge von Pyrogenausschüttung in den Kreislauf. Ursächlich sind meist Kontakte von Makrophagen mit Exogenen Pyrogenen (Lipopolysacharidkomplexe, so genannte „Endotoxine“ gram-negativer Bakterien) oder seltener Zytokinausschüttung in die Blutbahn infolge von Schädigung körpereigener Zellen durch chemische oder mechanische Effekte.

Zentrales Fieber

Das so genannte zentrale Fieber, welches auch als neurogenes Fieber bezeichnet wird, ist ein Syndrom, dass zuerst 1939 beschrieben wurde [22]. Hier beschrieb der Autor einen Temperaturanstieg infolge von neurochirurgischen Eingriffen am Gehirn.

Das Syndrom ist in der Regel eine Ausschlussdiagnose bei Patienten, bei denen Fieber im Zusammenhang mit einer Schädigung des zentralen Nervensystems auftritt und bei denen eine Infektion mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann, weil der Patient keine dafür typischen Anzeichen (z. B. Leukozytose, Verschattungen der Lungenfelder im Röntgen-Thorax etc.) aufweist außer der Erhöhung der Körpertemperatur [55]. Allerdings konnten die Autoren einen Unterschied im Verlauf des Fiebers nachweisen. Ihnen zu Folge erfolgt die Ausbildung eines zentralen Fiebers deutlich schneller als im Falle einer Infektion, ebenso halten sich die Temperaturen zeitlich länger auf einem erhöhten Niveau, nämlich über Tage bis Wochen. Auch sei

der Temperaturanstieg höher als im Infektionsfalle. Dabei seien Patienten mit einer der folgenden Diagnosen besonders häufig vom Auftreten des zentralen Fiebers betroffen: Subarachnoidale Blutung, Einblutung in die Ventrikel, Hirntumore. Was diesen drei Diagnosen gemein ist, ist die intrakranielle Druckerhöhung.

Die Datenlage ist relativ spärlich und viele Studien haben nur geringe Fallzahlen, daher variiert der in der Literatur zu findende Prozentsatz der Inzidenz stark, je nach Quelle. Es finden sich Inzidenz-Angaben für das zentrale Fieber zwischen 4% und 37% der Patienten mit Kopfverletzungen [23].

In einer der wenigen Studien, die sich mit Obduktionsbefunden von Patienten beschäftigen, die durch geschlossene Kopfverletzungen verstarben (explizit ausgenommen penetrierende Verletzungen, die direkt Hirnareale schädigen), wurde in 45 von 106 Fällen (entspricht 42,5%) eine hypothalamische Schädigung nachgewiesen [56]. Die Schäden umfassten Microeinblutungen, ischämische Nekrosen oder das gemeinsame Auftreten beider Effekte. Weder die Richtung der Krafteinwirkung auf den Schädel, noch das grundsätzliche Auftreten von Frakturen gingen mit der Hypothalamusschädigung häufiger einher. Jedoch zeigte sich eine hohe Rate von 92%, was das gemeinsame Auftreten von Frakturen der Fossa media cranii und gleichzeitiger hypothalamischer Schädigung betrifft.

Da wie bereits oben beschrieben, die hypothalamische Region eine zentrale Rolle bei der Fieberentwicklung spielt, und zwar sowohl über chemotaktisch-hämatogenem, wie auch neuronalem Weg, kann ein Auslösen von Fieber infolge von Schädigungen der hypothalamischen Zellen zumindest als möglich, wenn nicht gar wahrscheinlich erachtet werden.

Ziele der Arbeit

Opfer schwerer Schädel-Hirn Traumata und anderer massiver cerebraler Schädigungen zeigen oftmals ein in der Intensivmedizin bekanntes Phänomen, das als so genanntes „zentrales Fieber“ bezeichnet wird. Diese Temperaturerhöhung tritt ohne eine akute Infektion auf.

Sollte eine Temperaturerhöhung bei oder kurz vor einer Agoniestadium auftreten, so bestünde die Gefahr einer ungenaueren Todeszeitbestimmung, da die Temperatur gegenüber der physiologischen Normaltemperatur von ca. 37,2°C (so wie Sie als Ausgangstemperatur für die Todeszeitbestimmung nach Henssge betrachtet wird [2]), erhöhte Temperatur den Eindruck erwecken würde, der Tote wäre erst später verstorben, als dies der Fall ist.

Vor diesem Hintergrund sollte folgenden Fragen nachgegangen werden: Ist die Ermittlung des Todeszeitintervalls mittels des Nomogramms nach Henßge für an zerebralen Ursachen Verstorbene hinreichend sicher anwendbar? Wie wirkt sich eine Veränderung der Umgebungstemperatur auf den Abkühlungsverlauf und damit die Todeszeitschätzung aus?

Material und Methodik

Ergänzend zur Beschreibung im publizierten Anteil (S. 34 bzw. S. 2 des Artikels Abschnitt 2): Für diese Arbeit wurden Verstorbene der neurochirurgischen Intensivstation des Universitätsklinikums Düsseldorf (anfangs noch NCI04 später nach einem Umzug der Station ZI13) in den Jahren 2015 bis 2017 wiederholten Leichenschauen in der ersten, dritten und neunten Stunde p.m. unterzogen.

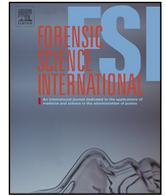
Es erfolgte bei jeder Untersuchung, neben den o.g. (S. 34) Daten, die Erfassung von:

- Überprüfung supravitaler Funktionen (elektrisch an mimischer Muskulatur und mechanisch am M. quadrizeps femori)
- Beurteilung der Totenflecken

Bei der Wiederholung der Datenerfassung in der dritten und neunten Stunden p.m., wurde bei der Erfassung in der dritten Stunde p.m. zusätzlich die chemische Erregbarkeit der Augenmuskulatur mittels Einträufeln von Atropin überprüft.

Die erhobenen Daten wurden in einem Protokoll festgehalten und mit einer fortlaufenden dreistelligen Fallnummer versehen (beginnend mit 001). Fortan wurde ausschließlich diese anonymisierte Form verwendet. Wenn es nicht möglich war alle 3 Leichenschauen/Messungen vorzunehmen, wurde die Fallnummer mit einem fortlaufenden Buchstaben (beginnend mit „A“) versehen und entsprechend ohne Buchstaben beim nächsten Verstorbenen erneut vergeben um eine lückenlose Nummerierung verwenden zu können.

Nach der Erfassung wurden die Messwerte mit den zu erwartenden Ergebnissen der etablierten Methode des Henßge-Nomogramms verglichen [45]. Dies wurde mittels Anwenden der dem Nomogramm zugrundeliegenden Formel für die 3 Messpunkte durchgeführt, mit besonderem Fokus auf den Einfluss des Temperatursprungs infolge des Transports in den Kühlraum und der Anwendung von Henßges Modifikation für Temperatursprünge [1].



Estimation of time since death after a post-mortem change in ambient temperature: Evaluation of a back-calculation approach



Marcel Bovenschen^a, Holger Schwender^b, Stefanie Ritz-Timme^a, Kerim Beseoglu^c, Benno Hartung^{a,*}

^aInstitute of Legal Medicine, University Hospital Düsseldorf, Germany

^bInstitute of Mathematics, Heinrich-Heine-University, Düsseldorf, Germany

^cDepartment of Neurosurgery, University Hospital Düsseldorf, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 August 2020

Accepted 8 December 2020

Available online 15 December 2020

Keywords:

Death time

Temperature

Back-calculation

Cooling storage

Temperature change

ABSTRACT

The temperature-based “Henssge method” is widely applied for death time estimation. For cases with a sudden post-mortem (pm) change in ambient temperature (e.g., by bringing the deceased into a cooling chamber), a mathematical approach has already been proposed [1] that enables estimation of the time of death by back-calculation of body temperature.

This approach was evaluated under clinically controlled conditions. Twenty-five individuals who died in a neurosurgical intensive care unit were brought to cooling storage after approximately 3 h pm. Body temperature was repeatedly measured on the ward and in cooling storage over a period of 9 h pm.

Back-calculation of body temperature was carried out on the basis of the proposed mathematical approach for cases with pm changes in ambient temperature; the results were compared to the known body temperatures.

In many cases, the back-calculated and true body temperatures differed widely. Bodies regularly cooled down slower after being brought into cooling storage than the back-calculations indicated. The sudden change in ambient temperature could only be addressed roughly by the proposed method of back-calculation.

In conclusion, the evaluated approach for addressing pm changes in ambient temperature should only be applied with great caution.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The so-called Henssge nomogram [2–10] is routinely run and the most widely used temperature-based method for estimating the time since death. It relies on repetitive examinations of body cooling behaviour under different conditions and was successfully verified in a field study [11]. The precision of the Henssge nomogram is said to be most precise within the first approx. 10 h post-mortem (pm) [12].

The usual Henssge nomogram does not consider sudden changes in the ambient temperature, e.g., when bringing the deceased into a cooling chamber. However, Althaus and Henssge [1] proposed a mathematical approach that should enable the estimation of the time of death in this situation as well. They

performed cooling experiments with dummies [1,10,13]. In this setting, the method was reliable when the ambient temperature changed from warm to cold [1]. After the body was brought into cooling storage, a second temperature plateau was observed. The cooling behaviour of the body was calculated (or back-calculated) by application of a three-step procedure [1] that was based on normal cooling behaviour.

The following formula expresses body cooling behaviour [14,15]:

Equation (a):

$$Q = \frac{T_r - T_a}{T_0 - T_a} = A \times \exp(B \times t) + (1 - A) \times \exp\left(\frac{A \times B}{A - 1}\right) \times t$$

T_r : rectal temperature,

T_a : ambient temperature,

T_0 : body temperature at the point of death or at the time of the temperature drop,

t : pm interval,

* Corresponding author.

E-mail address: benno.hartung@med.uni-duesseldorf.de (B. Hartung).

B: constant (measure of the logarithmic cooling rate after the plateau under consideration of individual body weight and a corrective factor),

A: constant (measure of the plateau)

To apply the approach, the point of time when the ambient temperature change occurred must be known. For the calculation of cooling behaviour in cooling storage, t (in equation (a)) represents only the time spent in cooling storage, and a value of 1.15 instead of 1.25 must be used for the constant A in step 1. Step 1 leads to the body temperature at the time of the temperature drop. Step 2 represents the standard back-calculation to the unknown point of death. For the calculation of cooling behaviour on the ward, t (in equation (a)) represents only the time spent on the ward after death. In step 3, the intervals of both cooling phases are added.

That is, equation (a) is used for calculating cooling behaviour both before and after transport into cooling storage, where the constant A is either 1.15 or 1.25 and t_0 stands for body temperature either at the point of death or at the time of the temperature drop.

This approach has not been evaluated under realistic conditions. To clarify the question of whether a sudden change in ambient temperature can be adequately considered when estimating the pm interval by the approach of Althaus and Henssge [1], estimation of the death time was simulated under clinically controlled conditions. The body temperatures of individuals who died in a neurosurgical intensive care unit were documented perimortem and pm. The bodies were brought from the ward to the hospital's cooling chamber approximately 3 h after death. Starting from different pm intervals, body temperatures were back-calculated by the approach of Althaus and Henssge [1]; the calculated and true temperatures were compared.

The trial was pre-approved by the ethics committee of the University of Düsseldorf (study number: 4553).

2. Materials and methods

Body temperature data and other pm parameters of all persons who died in the neurosurgical intensive care unit were collected.

In 25 cases, data were collected within 1 h pm (M1) as well as approximately 3 and 9 h pm (M2 and M3; Fig. 1). All examinations were independent from the legally prescribed pm body examinations. The times of death were recorded precisely by the intensive care unit (ICU).

2.1. Data collected for estimation of the time since death

Within the 1st h pm, the following data were collected:

- core body temperature measured rectally, at least 8 cm and max. 15 cm ab ano (Testo 112, Testo SE & Co., KGaA, Germany), or intravesically (either temperature sensor 400 TM or Teleflex Rüscher sensor series 400),
- room temperature 1 m above the ground (Testo 112), and
- surrounding conditions (e.g., clothes, blankets, body bag, mattress, stretcher; Table 1).

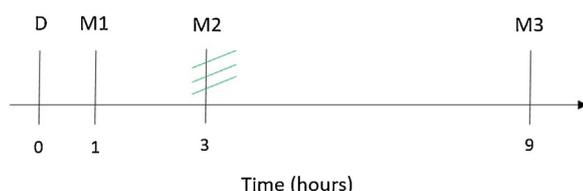


Fig. 1. Scheme of measurements (D: point of death; M1, M2, M3: time points of measurement; hatched area: interval of ambient temperature change).

Temperature measurements (body, surrounding temperature) were repeated, and surrounding conditions were re-evaluated in the 3rd and 9th h pm (only by Testo 11, Testo SE & Co., KGaA, as the intravesical thermometer had to be removed shortly after death occurred).

An overview of the measurements that were carried out is depicted in Fig. 1.

2.2. Additional collected data

According to the death certificates, the *causes of death* were:

- Herniation after cerebral bleeding: 14,
- Herniation after direct skull fractures: 3,
- Prolonged death with final multi-organ failure: 3,
- Prolonged death with or because of septic conditions: 5,
- Apoplectic infarction: 5,
- Increased intracranial pressure for other reasons: 1.

Documented general data included the following:

- body weight (kg; Table 1),
- body length (cm; Table 1),
- age (years),
- main diagnosis and underlying health conditions,
- medication (past and present),
- other forms of therapy and times of treatment (especially neurosurgical interventions), and
- if available, time of the last clinically measured normothermic temperature.

2.3. Transfer to cooling storage

Bodies were usually brought from the ICU to the cooling chamber after approximately 3–3.5 h (range 2–4.5 h; one body was not exposed to the cooling chamber within the study interval: subject 18; Table 1). The point of time when the bodies were brought to the cooling chamber was documented. This setting allowed evaluation of the sudden decrease in ambient temperature.

2.4. Back-calculations of body temperature from measurement 3 to the estimated time of death

Using the methods of Althaus and Henssge [1], mathematical back-calculation of the body temperature was conducted from the measured value in the 9th h pm to the point of death. The back-calculations were based on published examinations of the cooling behaviour of standardised mannequins, which were exposed to a temperature drop from 21 °C to 4 °C. The results were compared to the true values.

The following partially simplifying and generalising assumptions were made for estimating the time since death:

- all persons died with body temperatures of 37.2 °C,
- all bodies were slightly clothed, covered, and placed on hospital beds ([15]Table 1) between measurement 1 and the time of ambient temperature decrease; a corrective factor (CF) of 1.1 was applied for all subjects,
- subjects were covered with bed sheets and shirts in possibly insulating body bags on cooling accelerative steel stretchers (Table 1) between the time of ambient temperature decrease and measurement 3; a CF of 1.0 was applied for all subjects,
- if the second measurement was conducted at room temperature, the mean values of the 1st and 2nd measurements were

Table 1

Most relevant general data; AT: ambient temperature (h pm); BMI: body mass index; M: mattress; B: bed sheet; D: duvet; D/B: duvet filled with another bed sheet; PS: patient shirt; BB: body bag.

Subject	Body weight (kg)	Body length (cm)	BMI (rounded)	Coverage and underlay before AT change	Change of AT (hrs)	Coverage and underlay after AT change
1	95	175	31	M, B, D/B, PS	2,5	BB, PS, 2 B
2	100	194	27	M, B, D/B, PS	2	BB, PS, 2 B
3	74	178	23	M, B, D/B, PS	2,5	BB, PS, 2 B
4	62	168	22	M, B, D/B, PS	2,5	BB, PS, 2 B
5	72	168	26	M, B, D/B, PS	3	BB, PS, 2 B
6	80	180	25	M, B, D/B, PS	2,5	BB, PS, 2 B
7	70	172	24	M, B, D/B, PS	3	BB, PS, 2 B
8	105	175	34	M, B, D/B, PS	2	BB, PS, 2 B
9	74	170	26	M, B, D/B, PS	2	BB, PS, 2 B
10	75	175	24	M, B, D, PS	4,5	BB, B, D
11	80	175	26	M, B, D/B, PS	4	BB, PS, 2 B
12	80	170	28	M, B, D/B, PS	4	BB, PS, 2 B
13	75	172	25	M, B, D/B, PS	3	BB, PS, 2 B
14	80	175	26	M, B, D/B, PS	3,5	BB, PS, 2 B
15	90	175	29	M, B, D/B, PS	3,5	BB, PS, 2 B
16	82	178	26	M, B, D, PS	3,5	BB, B, D
17	60	170	21	M, B, D, PS	4	BB, B, D
18	75	182	23	M, B, D/B, PS	>9	BB, PS, 2 B
19	75	180	23	M, B, D/B, PS	3,5	BB, PS, 2 B
20	72	175	24	M, B, D, PS	3,5	BB, B, D
21	80	185	23	M, B, D/B, PS	3,5	BB, PS, 2 B
22	75	175	24	M, B, D, PS	3,5	BB, B, D
23	95	170	33	M, B, D/B, PS	3	BB, PS, 2 B
24	75	170	26	M, B, D/B, PS	3	BB, PS, 2 B
25	72	175	24	M, B, D, PS	2,5	BB, B, D

Table 2

Body temperature (BT, °C), ambient temperature (AT, °C), and time interval (h) from death until the change in ambient temperature (h) for measurements 1 (BT/AT 60 min), 2 (BT/AT 150 min), and 3 (BT/AT 510 min) for all cases with complete data.

Subject	BT 60 min	AT 60 min	BT 150 min	AT 150 min	BT 510 min	AT 510 min	Change of AT (hrs)
1	39.0°	21.5°	36.0°	5.0°	33.0°	10.8°	2,5
2	38.8°	21.9°	37.6°	2.8°	33.8°	3.7°	2
3	38.0°	22.6°	37.4°	22.6°	33.8°	7.4°	2,5
4	33.8°	23.4°	33.7°	23.8°	27.8°	13.7°	2,5
5	38.3°	19.5°	38.0°	19.9°	36.7°	3.6°	3
6	34.6°	21.9°	34.4°	20.3°	32.8°	4.2°	2,5
7	39.1°	23.4°	36.2°	23.2°	30.6°	6.9°	3
8	34.0°	20.1°	34.0°	12.3°	32.8°	3.5°	2
9	36.7°	22.3°	36.7°	7.1°	34.3°	7.9°	2
10	34.7°	22.3°	33.8°	22.1°	31.8°	10.5°	4,5
11	36.4°	22.2°	35.9°	22.1°	34.9°	6.0°	4
12	35.3°	22.9°	35.2°	20.6°	33.1°	5.9°	4
13	35.8°	22.4°	34.3°	21.3°	33.3°	7.6°	3
14	39.7°	22.3°	39.7°	22.3°	33.6°	6.0°	3,5
15	37.4°	22.2°	39.0°	22.2°	34.2°	6.0°	3,5
16	36.4°	22.0°	36.5°	21.9°	32.5°	9.5°	3,5
17	35.8°	21.4°	31.7°	20.6°	28.4°	5.3°	4
18	36.0°	22.1°	36.0°	21.5°	34.4°	22.2°	9
19	40.0°	20.2°	39.5°	20.2°	34.5°	4.5°	3,5
20	40.3°	22.8°	38.2°	22.8°	32.8°	8.5°	3,5
21	35.2°	21.8°	35.0°	21.4°	33.5°	7.1°	3,5
22	39.3°	20.9°	38.9°	20.9°	35.3°	5.0°	3,5
23	38.1°	21.4°	38.1°	21.6°	34.0°	5.3°	3
24	37.4°	21.4°	35.3°	21.2°	33.0°	7.5°	3
25	38.1°	22.2°	38.0°	22.0°	33.2°	8.9°	2,5

considered the average temperatures of the warmer room temperature,

- if the second measurement was conducted at room temperature, the temperature of the 3rd measurement was used as the cooling storage temperature,
- if the second measurement was conducted in cooling storage, the temperature of the 1st measurement was used as the warmer room temperature, and
- if the second measurement was conducted in cooling storage, the mean values of the 2nd and 3rd measurements

were considered average temperatures for the warmer temperatures.

2.5. Back-calculation of body temperature from measurement 3 to the time of ambient temperature decrease

Predictions of the body temperatures at the point of sudden decrease in the ambient temperature were also calculated according to [1]. Therefore, the body temperature of measurement

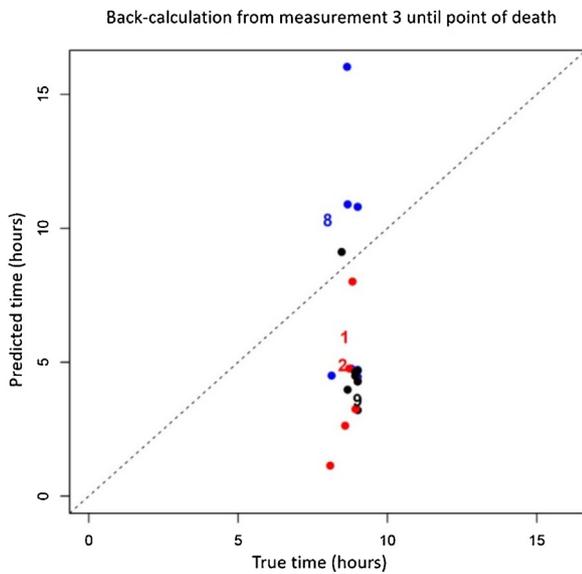


Fig. 2. Back-calculated time since death and true time since death (x-axis: h; y-axis: h); indicated by numbers: subjects who had already been brought into the cooling room when the 2nd measurement took place; indicated in colours: subjects with core body temperature below 36.2°C (blue) or above 38.2°C (red) at the time of measurement 1. $N = 24$ (subject 18 was excluded for this analysis). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

3 was used to back-calculate to the sudden change of the ambient temperature. If there was a time gap between measurement 2 and the sudden change in ambient temperature, the gap was bridged by extrapolation of the obtained curves. The results were compared to the true body temperature.

3. Results

3.1. Body temperatures at different points of time

As shown in Table 2, the body temperature measured within the 1st h pm varied between 33.8°C and 40.3°C . The core temperatures of subjects 15 and 16 rose from measurement 1 to

measurement 2 (body temperatures BT 60 min and BT 150 min, respectively).

3.2. Complete temperature-based back-calculation (from measurement 3 to the estimated time of death)

As stated above, subject 18 had to be excluded for the back-calculations from the 9th h pm to the assumed point of death and the time when the temperature change occurred, as the body was not exposed to a relevant change in ambient temperature.

The back-calculations from measurement 3 to the assumed point of death gave varying results. The back-calculated pm interval was shorter than the true interval since death in 19 cases and longer than the true interval since death in 5 cases. The data depicted in Fig. 2 show that the core body temperature at the point of death plays a crucial role in correctly estimating the point of death. The death time intervals of subjects with core temperatures below 36.2°C at the time of death were regularly overestimated (i.e., too long) (blue dots; Fig. 2), and those of subjects with core temperatures above 38.2°C were underestimated (i.e., too short) (red dots; Fig. 2).

The back-calculated cooling behaviour of the bodies for the time spent on the ward was mostly close to reality (Figs. 3–6). The back-calculated and real cooling curves are roughly parallel for the time spent on the ward. However, several false high temperatures were seen when back-calculating the time the subjects spent in cooling storage (Figs. 4–6). Body cooling is overestimated for this section in most cases (Figs. 4–6). It is not surprising that the estimated point of death is crucially biased by the body temperature at the time of death (red lines: Fig. 4–6).

Fig. 3 presents an exemplary case of a highly appropriate death time back-calculation. The back-calculated point of death would have been very close to the true point of death (appr. 40 min ante-mortem). Figs. 4–6 present exemplary imperfect death time estimations, which are mainly due to the time spent in cooling storage. In all presented cases, confidence intervals are $\pm 2 \cdot 1.4$ h to the estimated point of death [2].

The predicted point of death was usually later than the true point of death. The median deviation was approximately 4 h pm (Fig. 7).

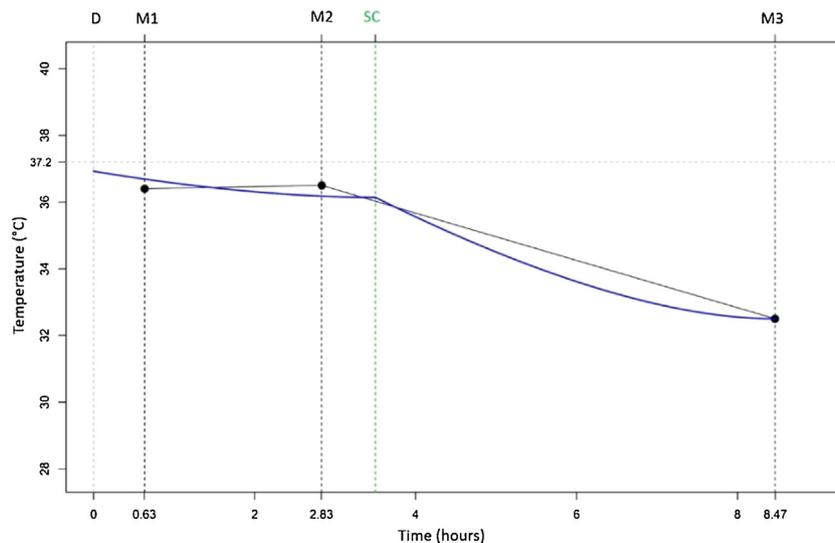


Fig. 3. Back-calculation of the interval since death for subject 16 (M1, M2, M3: time points of measurement; D: point of death; SC: sudden change in the ambient temperature; estimated point of death: 40 min ante-mortem; black dots: results of body temperature measurements; blue line: back-calculated temperature). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

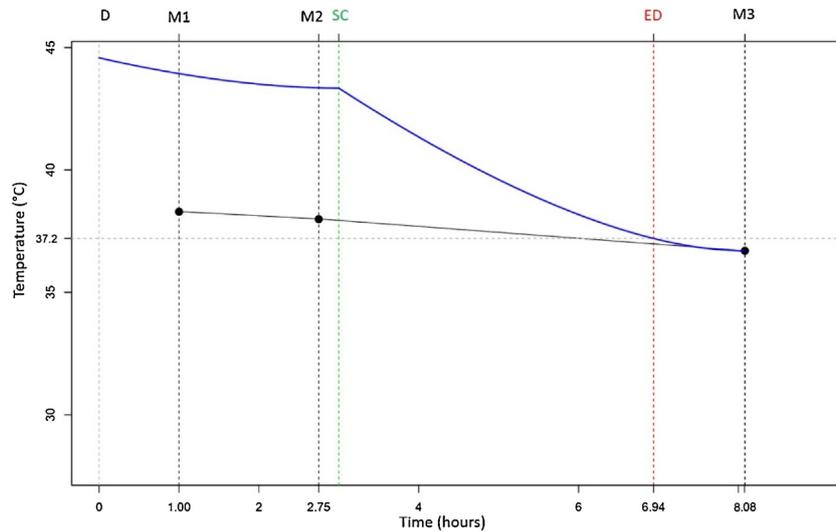


Fig. 4. Back-calculation of the interval since death for subject 5 (M1, M2, M3: time points of measurement; D: point of death; SC: sudden change in the ambient temperature; ED: estimated point of death; black dots: results of body temperature measurements; blue line: back-calculated temperature). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

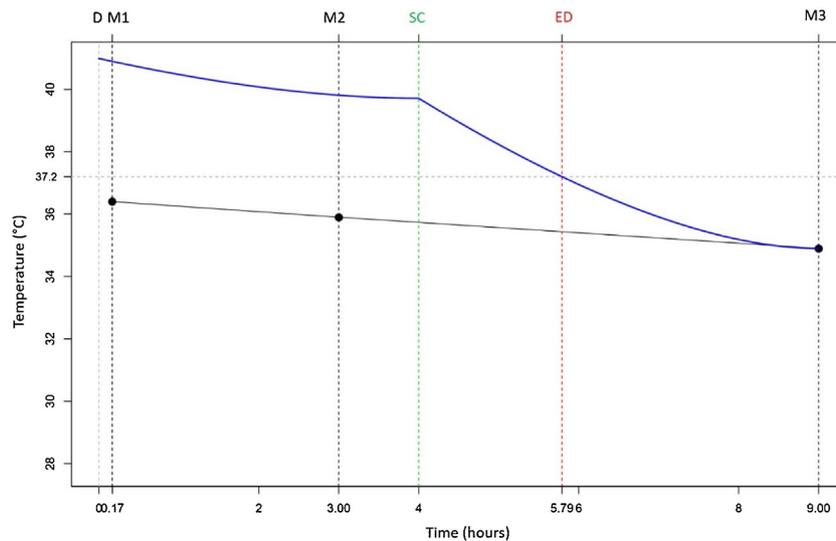


Fig. 5. Back-calculation of the interval since death for subject 11 (M1, M2, M3: time points of measurement; D: point of death; SC: sudden change in the ambient temperature; ED: estimated point of death; black dots: results of body temperature measurements; blue line: back-calculated temperature). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

3.3. Back-calculations from measurement 3 to the time of ambient temperature decrease

As can be extracted from Fig. 8, the true temperature in the 3rd h pm was regularly lower than the temperature predicted according to [1]. This was also applicable for those bodies that had already been brought to the cooling chamber when measurement 2 took place.

4. Discussion

Death time estimation by using the Henssge nomogram is usually the best guess that can be provided for investigative authorities. It is not only fast but also simple and inexpensive. Not surprisingly, a transfer into cooling storage has significant implications for temperature-based death time estimation approaches. Althaus and Henssge [1] suggested a mathematical approach to solve this problem. To our knowledge, this

back-calculation approach has not been systematically evaluated under realistic conditions (deceased instead of dummies) to date.

In 50 % of the cases, the body temperatures that were back-calculated via the proposed approach differed from the true temperatures by more than 1 °C. The cooling velocity in cooling storage was generally overestimated (Fig. 8). This finding was independent of the significantly varying body temperatures at the time of death.

An explanation for this inconsistency might be that back-calculations for the time in cooling storage were established using mannequins (approx. 30 and 7 kg in weight corresponding to “virtual” weights of 58.7 and 24.6 kg, respectively) with core temperatures of approximately 37 °C. The intervals of 7.5 h, which the large mannequins spent in the cooling chamber (4 °C), are comparable to our approach [1]. Hereby, it has to be pointed out that a CF of 1.1 was applied for the cooling time on the ward, though there may be arguments for applying

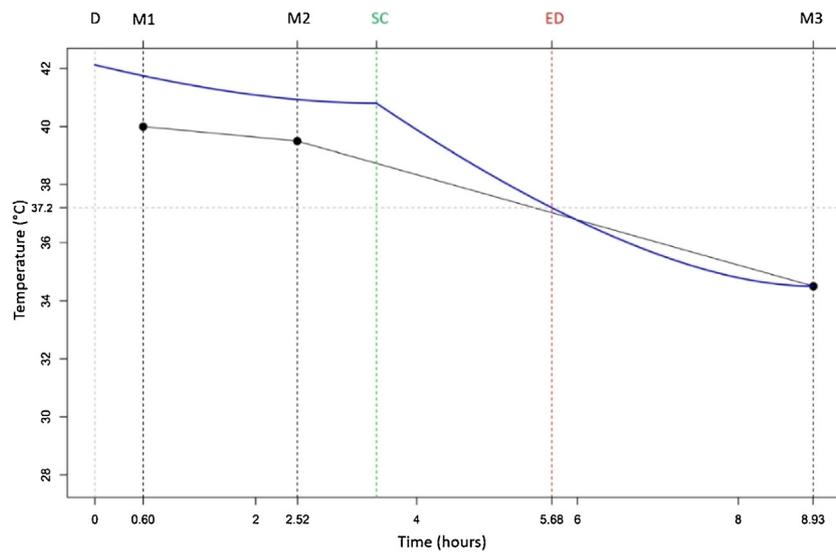


Fig. 6. Back-calculation of the interval since death for subject 19 (M1, M2, M3: time points of measurement; D: point of death; SC: sudden change in the ambient temperature; ED: estimated point of death; red lines: death time interval; black dots: results of body temperature measurements; blue line: back-calculated temperature). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

higher CFs (e.g., 1.3 [16]), as the mattress might be considered insulating.

In conclusion, sudden pm changes in ambient temperature cannot be adequately addressed by the proposed approach [1]. If such back-calculations of body temperature must be carried out for a certain reason, the accompanying uncertainties should be pointed out very clearly.

At the same time, the presented data confirm that death time estimation by back-calculation using the Henssge nomogram (step 2 [1], as stated above) is reliable as long as there was no ambient temperature change and as long as the body temperature at the point of death is known or most likely assessable.

On the basis of the data collected, it is not possible to make a proposal for adjusting the constant B after placing a body into a cooling room. For a meaningful linear regression, data would have to be collected at considerably more measurement points.

Moreover, the presented data could be interesting regarding some other points. The data do not confirm the assumption that the Henssge nomogram might overestimate the time since death in tall and/or massive bodies [17], as there were no severely overweight or tall deceased persons included. Subject 2 was tall (194 cm) but of roughly normal build (BMI 27), and the back-calculations for this subject fit the real temperatures quite well. Subjects 1, 8, and 23 were overweight (BMI > 30) but of rather normal or small height (170–175 cm). In 2 cases, increases in body temperature were observed within the first h pm (subjects 15 and 16). This finding was already described in early studies on death time estimation [18–20] and confirmed by Marshall and Hoare [13]. Marshall and Hoare [13] discussed metabolic processes on a

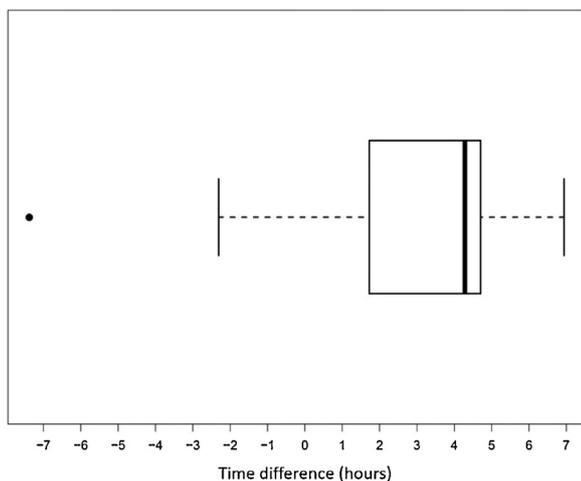


Fig. 7. Time difference (x-axis) between the true point of death and the back-calculated point of death (positive values indicate that the estimated point of death lies after the real point of death; negative values indicate that the estimated point of death lies before the real point of death). Box contains 50 % of the tested persons, the line inside the box indicates the respective median, and the satellites and respective outliers indicate 25 % of the tested persons. Outliers are presented as dots. N = 24.

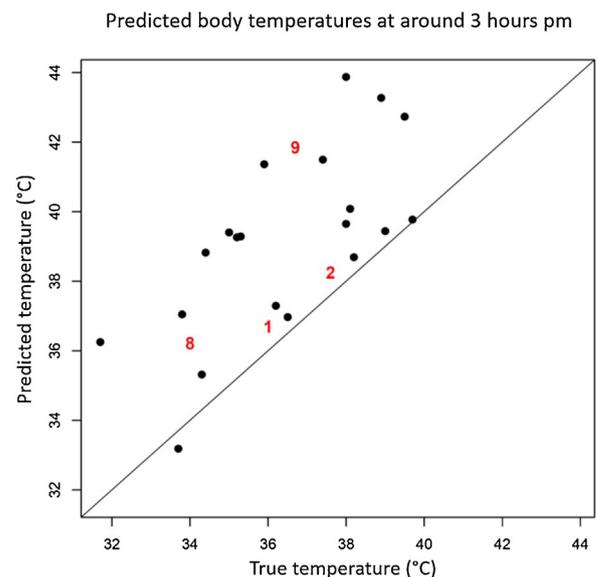


Fig. 8. Predicted body temperatures for the different measurement 2 time points (x-axis: true temperature in °C; y-axis: predicted temperature in °C); indicated in red: subjects who had already been brought into the cooling room when the 2nd measurement took place. N = 24 (subject 18 was excluded for this analysis). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

cellular level and cooling differences between compartment borders and cellular membranes as possible reasons. The authors do not support another theory that craniocerebral injuries can still affect the physical rules of body cooling behaviour pm.

5. Conclusions

Death time estimations should not be based on only a single method but on various methods. For example, toxicological findings might help to determine the point of death, especially if drugs or other substances (e.g., coffee) were administered at known points of time.

A recently described thermodynamic finite-difference model that claims average deviations of only ± 38 min (maximum ± 3.2 h) for pm intervals of up to 50 h seems promising but still needs to be tested in daily practice [21].

One could also consider performing or at least re-performing death time estimations after having carried out histological examinations to detect possible infections, especially possible fever constellations. One could then point out that a longer time since death might also be likely. Basically, higher or lower body temperatures could be considered in the formulas published by Henssge et al. [e.g., 1], and death time estimation could be carried out more precisely in a second step.

6. Limitations

The study is limited mainly by two facts. First, the described calculations had to be based on certain assumptions, as stated in the Materials and methods section. Second, the allocated corrective factors represent the best guess of the authors, as the specifications for the adaption cannot consider every possible constellation.

Ethical standards

The experiments of this study comply with the current German laws. The study protocol was pre-approved by the ethics committee of the University Hospital Düsseldorf.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Acknowledgements

We are grateful to Professor Claus Henßge for his valuable scientific support during the study and while carrying out the evaluations.

References

- [1] L. Althaus, C. Henssge, Rectal temperature time of death nomogram: sudden change of ambient temperature, *Forensic Sci. Int.* 99 (1999) 171–178.
- [2] C. Henssge, Death time estimation in case work. I. The rectal temperature time of death nomogram, *Forensic Sci. Int.* 38 (3–4) (1988) 209–236.
- [3] C. Henssge, Die Präzision von Todeszeitschätzungen durch die mathematische Beschreibung der rektalen Leichenabkühlung, *Z. Rechtsmed.* 83 (1979) 49–67.
- [4] C. Henssge, Todeszeitschätzungen durch die mathematische Beschreibung der rektalen Leichenabkühlung unter verschiedenen Abkühlbedingungen, *Z. Rechtsmed.* 87 (1981) 147–178.
- [5] C. Henssge, B. Brinkmann, K. Püschel, Todeszeitbestimmung durch Rektaltemperaturmessungen bei Wassersuspension der Leiche, *Z. Rechtsmed.* 92 (1984) 255–276.
- [6] C. Henssge, S. Stückradt, B. Madea, Praktische Erfahrungen mit einem Abkühlungsdummy, *Beitr. Gerichtl. Med.* 4 (1986) 123–126.
- [7] C. Henssge, Rectal temperature time of death nomogram: dependence of corrective factors on the body weight under stronger thermic isolation conditions, *Forensic Sci. Int.* 54 (1992) 51–56.
- [8] C. Henssge, B. Madea, Estimation of the time since death in the early post mortem period, *Forensic Sci. Int.* 144 (2004) 167–175.
- [9] C. Henssge, B. Madea, Estimation of the time since death, *Forensic Sci. Int.* 165 (2–3) (2007) 182–184.
- [10] L. Althaus, S. Stückradt, C. Henssge, T. Bajanowski, Cooling experiments using dummies covered by leaves, *Int. J. Legal Med.* 121 (2) (2007) 112–114.
- [11] C. Henssge, L. Althaus, J. Bolt, A. Freislederer, H.T. Haffner, B. Hoppe, V. Schneider, Experiences with a compound method for estimating the time since death, *Int. J. Legal Med.* 113 (2000) 303–319.
- [12] E. Pellini, Time since death and body cooling: reevaluation of the Henssge nomogram, University Of Verona, 2011. Diss. PhD thesis 2011.
- [13] P. Bisegna, C. Henssge, L. Althaus, G. Guisti, Estimation of time since death: sudden increase of ambient temperature, *Forensic Sci. Int.* 176 (2008) 196–199.
- [14] T.K. Marshall, F.E. Hoare, Estimating the time of death. The rectal cooling after death and its mathematical expression, *J. Forensic Sci.* 7 (1962) 56–81.
- [15] C. Henssge, Temperature-based methods II, in: C. Henssge, B. Knight, Th. Krompecher, B. Madea, L. Nokes (Eds.), *The Estimation of the Time Since Death in the Early Postmortem Period*, Edward Arnold, London, 1995.
- [16] B. Madea, Methods for determining time of death, *Forensic Sci. Med. Pathol.* 12 (2016) 451–485.
- [17] H. Muggenthaler, M. Hubig, S. Schenkl, S. Niederegger, G. Mall, Calibration and parameter variation using a finite element model for death time estimation: the influence of the substrate, *Leg. Med. Tokyo (Tokyo)* 25 (2017) 23–28.
- [18] Taylor, Wilks, *Guy's Hosp. Rep.* vol. ix (1863) 180 London.
- [19] H. Rainy, On the cooling of dead bodies as indicating the length of time since death, *Glasgow: Glasg. Med. J.* 1 (1869) 323–330.
- [20] J. Simon, *Lancet* (1870) 21 1870 I.
- [21] L.S. Wilk, R.J. Hoveling, G.J. Edelman, H.J. Hardy, S. van Schouwen, H. van Venrooij, M.C. Aalders, Reconstructing the time since death using noninvasive thermometry and numerical analysis, *Sci. Adv.* 6 (2020) eaba4243.

Diskussion

Die Berechnungen der Todeszeiten erbrachten nur partiell vielversprechende Ergebnisse.

Die dort getroffenen Aussagen decken sich mit den Aussagen der früheren Autoren wie Taylor, Wilks, Rainy oder Marshall [18;19;14] welche zusammenfassend alle feststellten, dass im Verlauf der Abkühlung, vor allem nach der initialen Plateauphase die Todeszeit besser bzw. näher bestimmt werden konnte. Dies ist am ehesten darauf zurückzuführen, dass die thermodynamische Basis des newtonschen Abkühlungsgesetzes das Abkühlungsverhalten von menschlichen Leichnamen erst dann näherungsweise beschreibt, da es in seiner ursprünglichen Form für weniger komplexe Körper formuliert wurde. Außerdem gingen alle mathematischen Modelle von einer konstanten Umgebungstemperatur aus bzw. konnten keine wechselnden Umgebungsbedingungen erfassen. Für die Berechnungen müssen Näherungs- oder Durchschnittswerte verwendet werden, während vollständig thermodynamische Ansätze jeweils einzelne Werte für alle notwendigen Variablen während der gesamten zurückliegenden Abkühlungszeit benötigen würden. Diese Durchschnittswerte funktionieren unter durchschnittlichen Bedingungen hinreichend genau, stoßen jedoch an ihre Grenzen, sobald einer oder mehrere Faktoren nicht mehr dem Durchschnitt entsprechen, worauf auch diverse Autoren bereits hingewiesen haben [34;35]. Dieses Problem wird sich nicht grundsätzlich lösen lassen, da es unrealistisch ist, alle Umgebungsfaktoren der Lagerungsbedingungen eines Verstorbenen zwischen Todeszeitpunkt und Auffindezeitpunkt zu ermitteln, zumal dies selbst, wenn es möglich sein sollte, einen erheblichen Ermittlungs- und damit auch Kostenaufwand bedeuten würde. Infolge dessen erscheint es effizienter zu sein, entweder die Betrachtung auf möglichst stabile Faktoren zu lenken, die nur wenig durch andere Einflüsse im Verlauf ihrer Zustandsänderungen beeinflusst werden können (z.B. durch multifaktorielle Zusammenfassung wie es Marshall in seinem Size Factor „Z“ versuchte [35]), oder alternativ möglichst viele etwaige Varianten von Faktoren zu erfassen, um dann aus den diversen daraus folgenden Ergebnissen die wahrscheinlichste Todeszeit zu ermitteln, wie es in der „brute force“ Methodik z.B. üblich ist [57]. Davon unabhängig sollten auch bei Verwendung solcher Methoden interne Plausibilitätsprüfungen mit anderen Daten, die über den Tod des zu untersuchenden Verstorbenen ermittelt werden können erfolgen, um die

Aussagesicherheit der Methodik zu erhöhen (z.B. Supravitalzeichen, Zeugenaussagen etc.). Parallel dazu könnte man durch wiederholte Messungen der Temperatur des Verstorbenen die Genauigkeit der Todeszeitbestimmung erhöhen, da man hier einen Temperaturverlauf erhält. Dies kann, wie schon in früheren Quellen beschrieben [35] technisch sehr einfach durchgeführt werden, z.B. in festen Minutenintervallen nach dem Auffinden bzw. mit Beginn der Leichenschau. Nicht nur ist es möglich hierdurch Mittelwerte von Messungen zu bilden, die spezifischer sind, als allgemeine Durchschnittswerte, sondern man erhält ggf. eine bessere Kenntnis über das vorliegende Stadium des Abkühlungsverlaufs. Je mehr Messungen man durchführt, desto genauer beschreibt die sich daraus folgernde Kurve den aktuellen Abkühlungsverlauf und desto eher ist sie geeignet, das charakteristische Abkühlungsverhalten eines Leichnams zu einer bestimmten Zeit im Verlauf bei einer bestimmten Temperatur zu beschreiben – eine solche Bestimmung des Kurvenabschnitts auf dem sich am wahrscheinlichsten befindet kann eine weitere interne Plausibilitätsprüfung sein [57]. Es ist daher im Einzelfall zu empfehlen Temperaturbestimmungen am Verstorbenen wiederholt, ca. alle 30 min. [35] für die Dauer von mind. 3 Stunden durchzuführen. Dieser Zeitraum ergibt sich aus den o.g. Auswertungen und ist geeignet weitestgehend vorübergehende Störfaktoren im Effekt ihrer Auswirkungen heraus zu mitteln.

Lagerungsbedingungen in der Nähe physiologischer Temperaturwerte, oder Phasen von zeitweiliger Erwärmung p.m. behindern jedoch grundsätzlich jede auf newtons Abkühlungsgesetz basierende Methodik, da solche Prozesse nicht in der Methodik erfasst, sondern nur aus der mathematischen Umkehr abgeleitet werden können. Daher sollten Ergebnisse in Fällen, bei denen der Verdacht eines solchen Verlaufs besteht, mit großer Vorsicht verwendet und möglichst stark durch zusätzliche Plausibilitätsprüfungen unterfüttert werden.

Des Weiteren ist die Annahme einer durchschnittlichen Körpertemperatur von 37,2°C zum Todeszeitpunkt kritisch zu sehen. Die hier [60] untersuchten Verstorbenen zeigten erhebliche Unterschiede bzgl. der Körpertemperatur zum Sterbezeitpunkt bzw. in der ersten postmortalen Stunde von mehreren Grad Celsius. Dieses Intervall umfasste bei der Betrachtung aller Messungen bis 6,3°C. Das heißt, dass die Temperatur zu Beginn der Messreihen teilweise bereits unter (minimal 34,0°C), teilweise deutlich über 37,2°C (Maximal bei 40,3°C) lag. 11 Verstorbene lagen dabei oberhalb der für gewöhnlich angesetzten Durchschnittstemperatur, 9 deutlich

darunter. Lediglich 5 hatten zu Beginn der Abkühlungszeit eine physiologische Temperatur. Dennoch lag der Mittelwert der Temperatur in der ersten Stunde p.m. bei 37,21°C und entsprach damit dem physiologischen Standardwert, wie Henßge ihn für seine Formel nutzte. Damit muss die Frage, ob die Todeszeitschätzung bei dem hier untersuchten Kollektiv als besonders schwierig oder unzuverlässig anzusehen ist, bejaht werden. Die Mehrheit der Verstorbenen wies eine Hyperthermie auf, jedoch kamen auch Hypothermien häufig vor. Der Anteil der normothermen Verstorbenen war der geringste. Innerhalb des Versuchsaufbaus dieser Arbeit weisen Personen, die an einer zentralen zerebralen Ursache verstarben in der weit überwiegenden Mehrheit der Fälle (ca. 75%) eine unphysiologische Temperatur in der ersten Stunde p.m. auf. Eine Erwärmung über den Wert der Messung aus der ersten Stunde p.m. konnte im Rahmen dieser Arbeit nur in einem Fall festgestellt werden. Dies erfolgte bei einem initial normothermen Verstorbenen und sie betrug 1,6°C von der ersten zur zweiten Messung. Was die weiteren Befunde angeht, so wies dieser Verstorbene eher durchschnittliche Werte in Bezug auf Größe, Gewicht und Supravitalzeichen auf. Die einzige Besonderheit unter den Befunden war eine Alkoholintoxikation, welche bei keinem der anderen Probanden vorlag. Die Ursache dieser Temperaturerhöhung muss letztlich unklar bleiben.

In Hinblick auf die medizinischen Befunde der Verstorbenen im Kollektiv, das für diese Studie erfasst wurde, ist folgendes festzustellen: Etwa 70% der Verstorbenen waren männlichen Geschlechtes. Die Körpergröße und das Gewicht der Verstorbenen umfassen durchschnittliche Werte, der Größendurchschnitt lag bei 175,2 cm, wobei kein Verstorbener unter 168,0 cm oder 194,0 cm maß. Das Durchschnittsgewicht betrug 78,92 Kg, wobei hier ein Intervall von 60,0 Kg bis 105,0 Kg abgedeckt wurde. Dies entspricht weitestgehend den durchschnittlichen Werten der deutschen Bevölkerung gemäß des Informationssystems der Gesundheitsberichterstattung des Bundes [58], bei geschlechtsneutraler Betrachtung. Ca. 40% der Verstorbenen wiesen chronische Erkrankungen in der Anamnese auf, was ebenfalls durchschnittlich für Deutschland ist [59]. Daher kann man zusammenfassend sagen, dass die Verstorbenen im Kollektiv dieser Studie keine extremen medizinischen Auffälligkeiten besaßen.

Zusammenfassung

Durch die Einbeziehung lediglich zweier Messungen (einmal die Rektaltemperatur und einmal die Umgebungstemperatur) zum annähernd selben Zeitpunkt ist die Methode nach Henßge schnell, einfach und kostengünstig bei hinreichender Genauigkeit. Das gilt auch weitestgehend für Tod durch zerebrale Ursachen. Generell empfiehlt es sich jedoch, die mit ihr ermittelten Ergebnisse durch die Erhebung weiterer Befunde auf Plausibilität zu überprüfen. Dies kann im Einzelfall auch relativ einfach durch mehrere Temperatur-Messungen im zeitlichen Verlauf erfolgen, insbesondere falls es Hinweise auf eine schnellere Abkühlung gibt. Im Falle von zentralen zerebralen Ursachen sollte neben der Standardberechnung ggf. auch eine für Körpertemperaturen von bis zu 3°C unter-, sowie oberhalb des physiologischen Durchschnitts von 37,2° durchgeführt und ebenfalls auf Plausibilität geprüft werden. Grundsätzlich sollten die ebenfalls kritisch zu interpretierenden Supravitalzeichen und die Totenfleckausprägung mit erhoben werden. Es sollte grundsätzlich auch in Betracht gezogen werden, die Todeszeit mittels der Finite-Elemente Methode nach Mall oder mittels nicht temperaturgestützter Verfahren zu prüfen, wie z.B. toxikologischer Verfahren oder mittels der Analyse des Magen- und Darminhalts z.B. hinsichtlich des Medikamentenmetabolismus.

Limitierend für die Ergebnisse ist vor allem die insgesamt geringe Anzahl der eingeschlossenen Fälle. Außerdem konnten die Einflüsse diverser Faktoren (z.B. die Wirkung der diversen medikamentösen Behandlungen und deren Wirkung auf die Körpertemperatur, die Tendenz zur geringeren körperlichen Aktivität von Intensivpatienten gegenüber der Normalbevölkerung, Drainagen des Liquorsystems etc.) der intensivmedizinischen Behandlung bis zum Eintritt des Todes im Rahmen der Methodik und des Aufbaus nicht hinreichend betrachtet werden. Auch wären ausschließlich durch Obduktion überprüfte Todesursachen wünschenswert gewesen. Daher wird grundsätzlich weitere Forschung in Bezug auf die Aussagekraft der Henßge-Methode bei bestimmten Todesursachen und Einflussfaktoren auf den Abkühlungsverlauf empfohlen.

Literatur- und Quellen Verzeichnis

- [1] L. Althaus, C. Henssge, Rectal temperature time of death nomogram: sudden change of ambient temperature, *Forensic Sci. Int.* 99 (1999) 171–178.
- [2] C. Henssge, Death time estimation in case work. I. The rectal temperature time of death nomogram, *Forensic Sci. Int.* 38 (3–4) (1988) 209–236.
- [3] C. Henssge, Die Präzision von Todeszeitschätzungen durch die mathematische Beschreibung der rektalen Leichenabkühlung, *Z. Rechtsmed.* 83 (1979) 49–67.
- [4] C. Henssge, Todeszeitschätzungen durch die mathematische Beschreibung der rektalen Leichenabkühlung unter verschiedenen Abkühlbedingungen, *Z. Rechtsmed.* 87 (1981) 147–178.
- [5] C. Henssge, B. Brinkmann, K. Püschel, Todeszeitbestimmung durch Rektal- temperaturmessungen bei Wassersuspension der Leiche, *Z. Rechtsmed.* 92 (1984) 255–276.
- [6] C. Henssge, S. Hahn, B. Madea, Praktische Erfahrungen mit einem Abkühlungsdummy, *Beitr. Gerichtl. Med.* 4 (1986) 123–126.
- [7] C. Henssge, Rectal temperature time of death nomogram: dependence of corrective factors on the body weight under stronger thermic isolation conditions, *Forensic Sci. Int.* 54 (1992) 51–56.
- [8] C. Henssge, B. Madea, Estimation of the time since death in the early post mortem period, *Forensic Sci. Int.* 144 (2004) 167–175.
- [9] C. Henssge, B. Madea, Estimation of the time since death, *Forensic Sci. Int.* 165 (2–3) (2007) 182–184.
- [10] L. Althaus, S. Stückradt, C. Henssge, T. Bajanowski, Cooling experiments using dummies covered by leaves, *Int. J. Legal Med.* 121 (2) (2007) 112–114.
- [11] C. Henssge, L. Althaus, J. Bolt, A. Freislederer, H.T. Haffner, B. Hoppe, V. Schneider, Experiences with a compound method for estimating the time since death, *Int. J. Legal Med.* 113 (2000) 303–319.
- [12] E. Pellini, Time since death and body cooling: reevaluation of the Henssge nomogram, University Of Verona, 2011 Diss. PhD thesis 2011.
- [13] P. Bisegna, C. Henssge, L. Althaus, G. Guisti, Estimation of time since death: sudden increase of ambient temperature, *Forensic Sci. Int.* 176 (2008) 196–199.
- [14] T.K. Marshall, F.E. Hoare, Estimating the time of death. The rectal cooling after death and its mathematical expression, *J. Forensic Sci.* 7 (1962) 56–81.
- [15] C. Henssge, Temperature-based methods II, in: C. Henssge, B. Knight, Th. Krompecher, B. Madea, L. Nokes (Eds.), *The Estimation of the Time Since Death in the Early Postmortem Period*, Edward Arnold, London, 1995.
- [16] B. Madea, Methods for determining time of death, *Forensic Sci. Med. Pathol.* 12 (2016) 451–485.
- [17] H. Muggenthaler, M. Hubig, S. Schenkl, S. Niederegger, G. Mall, Calibration and parameter variation using a finite element model for death time estimation: the influence of the substrate, *Leg. Med. Tokyo* 25 (2017) 23–28.
- [18] Taylor, Wilks, *Guy's Hosp. Rep.* vol. ix 180 London (1863).
- [19] H. Rainy, On the cooling of dead bodies as indicating the length of time since death, *Glasgow: Glasg. Med. J.* 1 (1869) 323–330.
- [20] J. Simon, *Lancet* 21 1870 I.
- [21] L.S. Wilk, R.J. Hoveling, G.J. Edelman, H.J. Hardy, S. van Schouwen, H. van Venrooij, M.C. Aalders, Reconstructing the time since death using noninvasive thermometry and numerical analysis, *Sci. Adv.* 6 (2020) eaba4243.
- [22] Erickson: *Neurogenic Hyperthermia*, *Brain* 62 (2) (1939), S.172-190
- [23] Zawadzka, Szmuda: *Thermoregulation disorders of central origin – how to diagnose and treat*, *Anaesthesiology Intensive Therapy*, vol. 49, no (2017), 227–234.
- [24] B. Madea, D. Krause, K. Jachau, *Praxis Rechtsmedizin*, Springer 2007 2. Auflage, S.32-52
- [25] Henssge, Madea, Gallenkemper (1988): Death time estimation in case work. II. Integration of different methods. *Forensic Sci Int.* 1988 Oct;39(1):77-87.
- [26] Benecke, M. *Forensic Entomology: Arthropods and Corpses.* Ed: M. Tsokos. *Forensic Pathology Reviews.* Vol. 2 Humana Press Inc. Totowa, NJ., 2004
- [27] K. Jellinghaus, P. K. Urban, C. Hachmann, M. Bohnert, G. Hotze, W. Rosendahl, U. Wittwer-Backofen: Ollagen degradation as a possibility to determine the post-mortem interval (PMI) of human bones in a forensic context – A survey, *Legal Medicine* 36 (2019) 96–102
- [28] Newton: *Scala graduum Caloris. Calorum Descriptiones & signa.* in *Philosophical Transactions*, 1701

- [29] Gekle, Singer: Wärmehaushalt und Temperaturregulation. In: Pape, Kurtz, Silbernagl (Hrsg.): Physiologie. 7. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 13. Kapitel, S. 566–584. 2014
- [30] Schmidt, Lang, Heckmann : Physiologie des Menschen. mit Pathophysiologie. 31. Auflage. SpringerMedizin Verlag, Heidelberg, S. 834–853., Kapitel 39 von Pontus B. Persson: Energie- und Wärmehaushalt, Thermoregulation 2010
- [31] R. Crompton: Hypothalamic lesions following closed head injury Brain 94 (1971), 165-172
- [32] Taylor, Swai'e: The principles and practice of medical jurisprudence, edited by Thomas Stevenson, fourth edition, Vol. 1, 1894, p. 46.
- [33] Schwarz, Heidenwolf: Le refroidissement post mortem. Sa signification quant à l'heure du décès, Revue int police crim 8 (1953) 339–344.
- [34] De Saram, Webster, Kathirgamatamby: Postmortem temperature and the time of death. J. Crim-Law Criminol. 46 (1955) 562–577.
- [35] Marshall: The use of the cooling formula in the study of post mortem body cooling. J. Forens. Sci. 7 (1962)189–210
- [36] Marshall: The use of the body temperature in estimating the time of death, J. Forens. Sci. 7 (1962) 211–221.
- [37] H.A. Shapiro: The Post-Mortem Temperature Plateau, Journal of Forensic Medicine, 12 (4), 1965: Seite 137-141.
- [38] H.A. Shapiro: Medico-legal mythology, J. Forens. Med., 1, (1953/54): 159.
- [39] Brown, Marshall: Body temperature as a means of estimating the time of death, Forensic Sci 4 (1974): 125-133.
- [40] Carslaw, Jaeger: Conduction of Heat in Solids, Clarendon Press, Oxford (1959), 19.59.
- [41] Marshall, Hoare: Estimating the time of death. The rectal cooling after death and its mathematical expression., J. Forens. Sci. 7, (1962), 56–81
- [42] H.P. Lyle, F.P. Cleveland: Determination of the time of death by body heat loss, J. Forens. Sci. 1 (1957) S. 11–23
- [43] B. Brinkmann, D. May, U. Riemann: Postmortaler Temperatenausgleich im Bereich des Kopfes. I. Meßtechnik, prinzipielle Untersuchungen, Z. Rechtsmed. 78 (1976) S. 69–82
- [44] C. Henßge, E.-R. Beckmann, F. Wischhusen, B. Brinkmann: Todeszeitbestimmung durch Messung der zentralen Hirntemperatur, Z. Rechtsmed. 93 (1984) S. 1–22
- [45] Henssge, Madea, Gallenkemper: Death time estimation in case work. II. Integration of different methods. Forensic Sci Int. 1988 Oct;39(1):77-87.
- [46] Singh, Shamar, Dewan: Polynomial Regression Model to estimate time since death in adults from rectal temperature in Chandigarh zone of north west india, Chandigarh, JIFAM 2005; 27:3.
- [47] Eckl: Temperaturgestützte Todeszeitschätzung bei nur partiell bekannten Umgebungsbedingungen, Ludwigs-Maximilian Universität München 2004.
- [48] Silbernagl, Lang: Taschenatlas der Pathophysiologie, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1998, S. 20.
- [49] Zilles, Rehkämper: Funktionelle Neuroanatomie, Heidelberg: Springer Verlag, 1993, S. 163-165).
- [50] Böker: Pathologie, 4. Auflage, München: Urban und Fischer Verlag für Elsevier, 2008, S.127.
- [51] Löffler: Basiswissen Biochemie, 6. Auflage, Heidelberg: Springer Verlag, 2004, S.284-286
- [52] K. Munk: Biochemie – Zellbiologie, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008, S. 78, 79.
- [53] Benninghoff, Drenckhahn: Anatomie Band 1, 16. Auflage, München: Urban und Fischer Verlag, 2003, S. 127-128.
- [54] Horn: Biochemie des Menschen, 3. Überarbeitete Auflage, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2005, S. 603.
- [55] Hocker, Tian : Indicators of central fever in the neurologic intensive care unit, JAMA Neurologie (2013) 70(12), S. 1499-1504.
- [56] R. Crompton: Hypothalamic lesions following closed head injury Brain 94 (1971), 165-172.
- [57] S. Potente, L. Henneicke, P. Schmidt: Prism – A novel approach to dead body cooling and its parameters; Forensic Science International Volume 325, August 2021, 110870
- [58] Gesundheitsberichterstattung des Bundes:
https://www.gbebund.de/gbe/lpkg_olap_tables.prc_set_page?p_uid=gast&p_aid=38808279&p_sprache=D&p_help=2&p_indnr=223&p_ansnr=23996132&p_version=3&D.000=3739&D.003=1000004
- [59] Robert Koch-Institut (Hrsg) (2014) Daten und Fakten:Ergebnisse der Studie »Gesundheit in Deutschland aktuell 2012«.Beiträge zur Gesundheitsberichterstattung des Bundes. RKI, Berlin
- [60] M. Bovenschen, H. Schwender, S. Ritz-Timme, K. Beseoglu, B.Hartung: Forensic Science International. 2021 Feb;319:110656 Estimation of time since death after a post-mortem change in ambient temperature: Evaluation of a back-calculation approach

Anhang

Protokoll Seite 1

Protokoll zur Todeszeitschätzung	
Rechtsmedizin Düsseldorf	
Fallnummer:	
Proband (Pat.ID):	Bisherige Therapie/ Eingriffe während des aktuellen Klinikaufenthalts:
Geb. Datum und Alter: Körpergröße in cm: Körpergewicht in Kg:	
Bekleidung/Bedeckung:	Zeit seit dem Akutereignis:
Diagnose(n):	Zeit seit dem letzten Ereignis (soweit nicht dem o.g. entsprechend):
Vorerkrankungen:	Todesursache (laut Totenschein):
Medikation:	Weitere Erkenntnisse aus evtl. Obduktion, Histologischen Befunden etc. :

1. Erhebung bei Todesfeststellung bzw. innerhalb von 60 min.

Todeszeitpunkt: / / , um : Uhr Erhebung: : Uhr am / /

Körperkerntemperatur: °C Raumtemperatur: °C

Bedeckung: Besondere Lagerungsumstände:

Totenflecke: ja Nein wegdrückbar: ja/ teilweise/ nein Farbe: hell/dunkel

Protokoll Seite 2

Muskuläre Erregbarkeit:

1. Idiomuskulärer Wulst: ja Nein Ausprägung: stark, normal, gering
2. Elektrische Erregbarkeit: ja Nein Ausprägung: stark, normal, gering

2. Erhebung ca. 3 Std. nach Todesfeststellung

Erhebung: : Uhr, am / /

Körperkerntemperatur: °C Raumtemperatur: °C

Bedeckung: Besondere Lagerungsumstände:

Totenflecke: ja Nein wegdrückbar: ja/ teilweise/ nein Farbe: hell/dunkel

Muskuläre Erregbarkeit:

3. Idiomuskulärer Wulst: ja Nein Ausprägung: stark, normal, gering
4. Elektrische Erregbarkeit: ja Nein Ausprägung: stark, normal, gering

Chemische Erregbarkeit: ja Nein Ausprägung: stark, normal, gering

3. Erhebung ca. 9 Std. nach Todesfeststellung

Erhebung: : Uhr, am / /

Körperkerntemperatur: °C Raumtemperatur: °C

Bedeckung: Besondere Lagerungsumstände:

Totenflecke: ja Nein wegdrückbar: ja/ teilweise/ nein Farbe: hell/dunkel

Muskuläre Erregbarkeit:

5. Idiomuskulärer Wulst: ja Nein Ausprägung: stark, normal, gering
6. Elektrische Erregbarkeit: ja Nein Ausprägung: stark, normal, gering

Protokoll zur Arbeit über die Auswirkung von SHTs verschiedener Art auf die Todeszeitschätzung mittels des Nomogramms nach Henssge von Marcel Bovenschen.

Erstellt durch Marcel Bovenschen.

Danksagung

Diese Doktorarbeit wurde mir nach einer Famulatur im düsseldorfer Institut für Rechtsmedizin durch Benno Hartung angeboten. Darüber war ich sehr froh, denn ich wollte unbedingt in diesem Fachbereich promovieren. Besonders freute mich dabei das interessante und spezielle Thema der Todeszeitschätzung. Ich war schon so begeistert von der Famulatur, da ich schon seit vielen Jahren Medizin studieren wollte ausschließlich um Rechtsmediziner zu werden. Und dies sah ich damals als den nächsten Schritt zu diesem lang gehegten Berufswunsch an. Ich muss leider zugeben, dass ich mir zu jener Zeit das ganze einfacher vorgestellt hatte, als es letztlich war.

Ich begann gemeinsam mit meinem Betreuer Dr. Hartung und Frau Prof. Dr. Ritz-Timme die Vorbereitungen für die Datenerhebung. Über die nächsten Jahre war ich in ständiger Rufbereitschaft für die neurochirurgische Intensivstation der Uniklinik Düsseldorf und fand mich zu wirklich jeder denkbaren Tages- und Nachtzeit in der Uniklinik wieder um Leichenschauen zur Datengenerierung durchzuführen. Auch war infolge des häufig wechselnden Personals der Intensivstation immer wieder Anwesenheit notwendig um die Kooperation am laufen zu halten. Teilweise in Form von Vorträgen für die dort arbeitenden, teilweise einfach nur um dort sein Gesicht zu zeigen und an sich zu erinnern. Nachdem die Datenerfassung abgeschlossen war musste ich mein Medizinstudium erstmal wieder organisieren. Das lag nicht primär an der Belastung durch die Datenerhebung, sondern vor allem an schlechten Prüfungsergebnissen meinerseits und der Mischung aus der Belastung durch meine Tätigkeit im Rettungsdienst des Rheinkreises Neuss, der allgemeinen Studienbelastung, der Umstellung auf einen Modellstudiengang und dazu der Datenerhebung mit 24/7 Bereitschaft, sofern ich nicht 24 Stundendienste im Rettungsdienst ableistete.

Erst mit Beginn meines praktischen Jahres 2018 konnte ich im Rahmen meines Wahltertials erstmals wieder länger und geordneter die erhobenen Daten bearbeiten und weitere Hintergründe recherchieren, sowie an den Berechnungen mit Prof. Dr. Schwender arbeiten. Da ich aber damals auch die Hoffnung hatte eine Weiterbildungsstelle für den Facharzt in Rechtsmedizin zu ergattern und bereits wusste, dass diese sehr begehrt sind stellte ich auch zu dieser Zeit die Doktorarbeit nicht an die erste Stelle, sondern arbeitete so viel wie möglich im Institut mit um Leistungsbereitschaft, überdurchschnittliches Interesse und Belastbarkeit zu demonstrieren.

Nachdem ich das Medizinstudium abgeschlossen hatte nahm ich mir einige Monate Zeit für die Doktorarbeit und bewarb mich parallel in rechtsmedizinischen sowie pathologischen Instituten – leider vergebens. Doch ich konnte erstmals große Teile der Texte fertigstellen. Außerdem absolvierte ich das Doktorandenprogramm der Medical Researchschool der Heinrich-Heine Universität Düsseldorf. Als ich es mir finanziell nicht mehr leisten konnte nahm ich eine Weiterbildungsstelle in der Psychiatrie an. Dies zwang mich, ähnlich wie die kurz darauf einsetzende Covid19 Pandemie dazu, die Doktorarbeit erneut weitestgehend ruhen zu lassen infolge der Belastung der Klinikarbeit mit Einarbeitung, Diensten, Weiterbildung etc. Einzig die Veröffentlichung des Fachartikels und die damit verbundene Arbeit viel in diesen Zeitraum. Als die Pandemie in ihrer Verlaufsstärke abnahm fand ich infolge von Krankenschreibung und Überstundenabbau endlich die notwendige Zeit für eine Fertigstellung.

Auch wenn sich mein beruflicher Weg leider nicht, wie erhofft entwickelt hat, so bin ich dennoch froh zumindest diese Arbeit verfasst zu haben und mit einer Promotion in einem rechtsmedizinischen Thema zumindest einen Teil dessen, was ich erreichen wollte erlangt zu haben.

Ich danke meiner langjährigen Lebensgefährtin Esther Welzel, die ich für immer lieben werde, für all die Unterstützung egal ob im Studium oder während späterer Tätigkeit parallel zur Promotionszeit die mir half bei Motivation, Organisation/Durchführung, Zeit und auch Finanzen

– ohne Dich wäre das diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Darüber hinaus danke ich auch meinen Eltern Yvonne Bovenschen und Horst Mauremann für Ihre Unterstützung während des spät angetretenen und langjährigen Studiums und der Zeit der Dissertationserstellung.

Ebenso Esthers Eltern Hedwig und Wilfried Welzel die mich, wenn auch oft indirekt, so doch dauerhaft während meiner Studienzeit und der anschließenden Promotionszeit unterstützten.

Auch will ich mich bei meinem Betreuer Benno Hartung bedanken für die Unterstützung und all die Geduld, die er aufbringen konnte bzw. auch musste auf meinem langen Weg der Fertigstellung und natürlich auch Frau Prof. Dr. Ritz-Timme für die grundsätzliche Möglichkeit der Promotion und die Unterstützung durch das Institut.

Zuletzt danke ich postum meinem guten Freund Thomas Urban, der mich einerseits durch seinen Rat und viel Zuhören überhaupt zu meiner Studierfähigkeit gebracht hat, als auch oftmals andere Blickwinkel und Bewertungen lehrte und der die Fertigstellung dieser Arbeit leider nicht mehr miterleben konnte.

Ohne die Hilfe der genannten wäre es nicht zur Vervollständigung dieser Arbeit gekommen.